

# MANUAL PARA EL PROYECTO, CONSTRUCCIÓN Y GESTIÓN DE PAVIMENTOS BICAPA DE HORMIGÓN

**Antonio AGUADO**

**Sergio CARRASCÓN**

**Sergio CAVALARO**

**Ivan PUIG**

**Corpus SENÉS**

**Barcelona, 24 Diciembre 2010**

# Índice

## PRÓLOGO

## PARTE A: BASES TEÓRICAS

### CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1.- ANTECEDENTES .....	1
1.2.- OBJETIVOS.....	5
1.3.- METODOLOGÍA SEGUIDA.....	6

### CAPÍTULO 2: PROYECTO

2.1.- INTRODUCCIÓN.....	9
2.2.- DISEÑO ESTRUCTURAL .....	10
2.3.- CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO.....	12
2.4.- CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLANADA .....	12
2.5.- SECCIONES DE HORMIGÓN .....	13
2.6.- ASPECTOS ESPECÍFICOS DE PROYECTO .....	17
2.6.1.- Juntas.....	17
2.6.1.a.- Junta transversal de contracción .....	18
2.6.1.b.- Juntas transversales de construcción .....	21
2.6.1.c.- Juntas longitudinales de contracción .....	21
2.6.1.d.- Juntas longitudinales de construcción .....	22
2.6.1.e.- Juntas de expansión.....	23

2.6.2.- Disposición de conectores y tamaño de la losa.....	24
2.7.- TRANSICIÓN Y CONEXIÓN CON OTROS SISTEMAS.....	26
2.7.1.- Transiciones con pavimentos flexibles .....	26
2.7.2.- Transiciones con puentes .....	27
2.7.3.- Conexión con el arcén.....	28
2.7.4.- Sistema de drenaje.....	30
2.7.5.- Marcas de señalización horizontal .....	30
2.7.6.- Intersección de vías, carriles de cambio de velocidad y cuñas de transición .....	31

### CAPÍTULO 3: EJECUCIÓN

3.1.- INTRODUCCIÓN.....	33
3.2.- EQUIPOS MECÁNICOS NECESARIOS.....	34
3.2.1.- Fabricación y transporte del hormigón .....	34
3.2.2.- Extensión .....	36
3.2.3.- Acabados.....	38
3.2.4.- Juntas.....	40
3.3.- EQUIPO HUMANO.....	41
3.4.- ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN .....	42
3.4.1.- Capa de regularización y soporte .....	43
3.4.2.- Extendido del hormigón y colocación de barras y pasadores .....	45
3.4.3.- Aplicación del inhibidor de fraguado y primer líquido curado .....	50
3.4.4.- Barrido.....	51
3.4.5.- Segunda aplicación de líquido curado .....	51
3.4.6.- Corte de juntas.....	52
3.4.7.- Sellado de juntas.....	53
3.4.8.- Juntas de fin de día.....	54
3.5.- INCIDENCIAS EN LA EJECUCIÓN.....	55
3.5.1.- Irregularidades en la superficie del pavimento.....	56
3.5.2.- Interrupción del extendido del hormigón.....	56

**CAPÍTULO 4: MATERIALES**

4.1.- INTRODUCCIÓN.....	59
4.2.- COMPONENTES DEL HORMIGÓN.....	60
4.2.1.- Cemento .....	60
4.2.2.- Áridos .....	60
4.2.3.- Agua .....	62
4.2.4.- Aditivos en el hormigón.....	62
4.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS HORMIGONES.....	63
4.4.- COMPONENTES DEL CURADO .....	64
4.5.- CAPA DE REGULARIZACIÓN Y/O SOPORTE.....	66
4.6.- COMPONENTES DE LAS JUNTAS.....	67
4.6.1.- Componentes de la unión de juntas.....	67
4.6.2.- Componentes del sellado de juntas .....	68

**CAPÍTULO 5: CONTROL DE CALIDAD**

5.1.- INTRODUCCIÓN.....	69
5.2.- CONTROL DE LA EXPLANADA .....	70
5.3.- CONTROL DE LA CAPA DE REGULARIZACIÓN.....	71
5.4.- CONTROL DE LOS HORMIGONES.....	73
5.4.1.- Previo al hormigonado.....	73
5.4.2.- Ensayos de control durante el hormigonado.....	75
5.5.- CONTROL DE ACABADO DEL PAVIMENTO .....	76
5.5.1.- Aspectos de control.....	76
5.5.2.- Criterios de aceptación o de rechazo .....	78

**CAPÍTULO 6: CONSERVACIÓN**

6.1.- INTRODUCCIÓN.....	81
6.2.- GESTIÓN DE LA CONSERVACIÓN .....	82
6.2.1.- Introducción .....	82
6.2.2.- Estrategias de actuación.....	83



6.2.3.- Bases de datos .....	85
6.2.4.- Datos del estado de la carretera.....	86
6.2.5.- Tratamiento de los resultados .....	88
6.3.- NIVELES Y ACTUACIONES DE CONSERVACIÓN .....	88
6.3.1.- Actuaciones ordinarias .....	89
6.3.2.- Renovaciones superficiales.....	91
6.3.3.- Rehabilitaciones estructurales .....	92
6.3.4.- Reconstrucciones .....	93

## **CAPÍTULO 7: ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD**

7.1.- INTRODUCCIÓN.....	97
7.2.- ASPECTOS ECONÓMICOS .....	98
7.2.1.- Eficiencia estructural .....	98
7.2.2.- Evaluación de los costes .....	99
7.2.3.- Reflectancia.....	100
7.3.- ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES .....	102
7.3.1.- Energía de construcción y energía embebida.....	102
7.3.2.- Energía de uso .....	103
7.3.3.- Durabilidad .....	104
7.4.- ASPECTOS SOCIALES .....	106
7.4.1.- Confort y seguridad del usuario .....	106
7.4.2.- Contaminación sónica .....	108
7.4.3.- Resistencia al fuego .....	109
7.5.- ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD .....	110
7.5.1.- Fases de la metodología MIVES.....	111
7.5.2.- Árbol de toma de decisión .....	112

## PARTE B

### CAPÍTULO 8: PROYECTO DEMOSTRACIÓN

8.1.- INTRODUCCIÓN.....	115
8.2.- PROYECTO .....	117
8.2.1.- Características principales del proyecto .....	117
8.2.2.- Solución de firme adoptada .....	119
8.2.3.- Aspectos específicos del proyecto.....	120
8.3.- MATERIALES .....	122
8.3.1.- Mezcla bituminosa de regulación .....	122
8.3.2.- Áridos .....	123
8.3.3.- Cemento .....	123
8.3.4.- Aditivos.....	124
8.3.5.- Características de los hormigones .....	124
8.3.6.- Otros materiales .....	125
8.4.- EQUIPOS TÉCNICO Y HUMANO .....	126
8.4.1.- Extendido de la capa de regularización bituminosa .....	126
8.4.2.- Fabricación y transporte del hormigón .....	126
8.4.3.- Extendido del hormigón.....	127
8.4.4.- Terminación y corte de juntas .....	128
8.4.5.- Equipo humano.....	129
8.5.- ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN .....	129
8.5.1.- Preparación de la explanada y capa de regularización.....	130
8.5.2.- Extendido de los hormigones.....	130
8.5.3.- Primer curado, barrido y segundo curado.....	134
8.5.4.- Corte y sellado de juntas .....	134
8.5.5.- Juntas de fin de día.....	135
8.5.6.- Rendimientos y consumos.....	136
8.5.7.- Observaciones y recomendaciones de ejecución .....	136
8.6.- CONTROL DE CALIDAD .....	137
8.6.1.- Control de los datos meteorológicos.....	137

8.6.2.- Control de la explanada .....	138
8.6.3.- Control de la capa bituminosa en la regularización.....	140
8.6.4.- Control del hormigón de las distintas capas .....	142
8.6.5.- Control de apertura de juntas .....	148
8.6.6.- Inspección visual del pavimento.....	149
8.6.7.- Control del pavimento acabado.....	149

## **CAPÍTULO 9: PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA PAVIMENTO BICAPA DE HORMIGÓN**

9.1.- DEFINICIÓN .....	155
9.2.- MATERIALES .....	156
9.2.1. Cemento.....	156
9.2.2. Agua.....	156
9.2.3. Árido.....	156
9.2.4. Aditivos .....	158
9.2.5. Pasadores y barras de unión.....	159
9.2.6. Membranas para curado del pavimento .....	159
9.2.7. Retardadores de fraguado y productos filmógenos de curado.....	159
9.2.8. Materiales para el sellado de juntas.....	160
9.3.- TIPO Y COMPOSICION DEL HORMIGON.....	161
9.4.- EQUIPO NECESARIO PARA LA EJECUCION DE LAS OBRAS .....	162
9.4.1. Central de fabricación.....	162
9.4.2. Elementos de transporte .....	164
9.4.3. Equipos de puesta en obra del hormigón: Pavimentadoras de encofrados deslizantes.....	164
9.4.4. Sierras.....	165
9.4.5. Distribuidores de retardador de fraguado y de productos filmógenos de curado.....	166
9.4.6. Equipos para eliminación del mortero superficial.....	166
9.5.- EJECUCION DE LAS OBRAS .....	166
9.5.1. Estudio y obtención de la fórmula de trabajo .....	166
9.5.2. Preparación de la superficie de apoyo .....	167

9.5.3. Fabricación del hormigón. ....	168
9.5.4. Transporte del hormigón. ....	170
9.5.5. Elementos de guía y acondicionamiento de los caminos de rodadura para pavimentadoras de encofrados deslizantes. ....	170
9.5.6. Colocación de los elementos de las juntas. ....	170
9.5.7. Puesta en obra del hormigón. ....	171
9.5.8. Terminación. ....	171
9.5.9. Numeración y marcado de las losas. ....	172
9.5.10. Protección y curado del hormigón fresco. ....	173
9.5.11 Ejecución de juntas serradas. ....	174
9.5.12. Sellado de las juntas. ....	175
9.6.- ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA. ....	175
9.6.1. Resistencia. ....	175
9.6.2. Alineación, rasante, espesor y anchura. ....	175
9.6.3 Regularidad superficial. ....	176
9.6.4. Textura superficial. ....	176
9.6.5. Resistencia al deslizamiento. ....	176
9.6.6. Integridad. ....	176
9.7.- LIMITACIONES DE LA EJECUCION. ....	176
9.7.1. Generalidades. ....	176
9.7.2. Limitaciones en tiempo caluroso. ....	177
9.7.3. Limitaciones en tiempo frío. ....	177
9.7.4. Apertura a la circulación. ....	178
9.8.- CONTROL DE CALIDAD. ....	178
9.8.1. Control de procedencia de los materiales. ....	178
9.8.2. Control de calidad de los materiales. ....	179
9.8.3. Control de ejecución. ....	180
9.9.- CRITERIOS DE ACEPTACION O RECHAZO. ....	182
9.9.1. Resistencia mecánica. ....	182
9.9.2. Integridad. ....	184
9.9.3. Espesor. ....	184
9.9.4. Rasante. ....	185

9.9.5. Regularidad superficial. ....	185
9.9.6. Textura superficial. ....	185
9.9.7. Resistencia al deslizamiento. ....	186
9.10.- MEDICIÓN Y ABONO .....	186
9.11.- ESPECIFICACIONES TECNICAS Y DISTINTIVOS DE CALIDAD .....	187

## **CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES**

10.1.- CONCLUSIONES GENERALES.....	189
10.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS.....	190

## **CAPÍTULO 11: BIBLIOGRAFÍA**

11.1.- REFERENCIAS CITADAS EN EL DOCUMENTO .....	195
11.2.- DIRECCIONES DE INTERNET DE INTERÉS EN EL TEMA .....	203

# Índice figuras

## Capítulo 1

Fig. 1.1.- Evolución del consumo energético para obtener una tonelada de Clinker en los últimos 40 años (Cardim, 2001) .....	3
Fig. 1.2.- Evolución de los precios del betón y del cemento en los últimos 30 años (Ministerio de Fomento) .....	5

## Capítulo 2

Fig. 2.1.- Esquema de la plataforma utilizada en la experiencia piloto de la C-17 .....	16
Fig. 2.2.- Junta transversal de contracción .....	18
Fig. 2.3.- Detalle de las juntas .....	19
Fig. 2.4.- Mapa de las diferentes zonas pluviométricas en España .....	20
Fig. 2.5.- Junta longitudinal de contracción .....	22
Fig. 2.6.- Junta transversal de expansión .....	23
Fig. 2.7.- Diagrama de distribución de juntas, pasadores y barras de atado según: a) norma española y b) norma austríaca .....	25
Fig. 2.8.- Transición de un pavimento bicapa de hormigón a un pavimento flexible .....	26
Fig. 2.9.- Transición de un pavimento bicapa y un puente (losa intermedia sobrepuesta) .....	27
Fig. 2.10.- Transición de un pavimento bicapa y un puente (losa intermedia contigua) .....	28
Fig. 2.11.- Tipos de arcenes .....	29
Fig. 2.12.- Tipos de arcenes .....	30

## Capítulo 3

Fig. 3.1.- Vertido del hormigón capa rodadura: a) Pala intermedia, b) tolva receptora ....	35
Fig. 3.2.- Vista general de la configuración de los distintos equipos .....	36
Fig. 3.3.- Parte anterior de la extendidora de la capa de base.....	37
Fig. 3.4.- Extendidora de la capa de rodadura .....	38

Fig. 3.5.- Parte posterior del tren de pavimentación correspondiente al carro de curado .....	39
Fig. 3.6.- Barredora montada sobre una motoniveladora adaptada .....	39
Fig. 3.7.- Eliminación de finos con el empleo de una minihoja autopropulsada .....	39
Fig. 3.8.- Equipo tipo para el segundo curado .....	40
Fig. 3.9.- Cortadoras de juntas: a) transversales y b) longitudinales.....	40
Fig. 3.10.- Equipos finalización de juntas: a) Cajeados y b) Introducción perfiles elastoméricos .....	41
Fig. 3.11.- Sobreancho de la capa asfáltica para zona de rodadura de los equipos .....	44
Fig. 3.12.- Sistema de guiado: a) Ubicación de estacas y b) sistema de guiado .....	44
Fig. 3.13.- Vista aérea del equipo de extendido y el suministro de los hormigones .....	45
Fig. 3.14.- Frente de la 1ª extendidora .....	46
Fig. 3.15.- Barras longitudinales: a) Colocación y b) aspecto del hormigón .....	46
Fig. 3.16.- Equipo colocación de los pasadores y barras de atado.....	47
Fig. 3.17.- Elementos de conexión: a). Pasadores y b) barras de atado.....	47
Fig. 3.18.- Frente de avance de la 2ª extendidora y hormigón de la capa de rodadura .....	48
Fig. 3.19.- Vertido distribuido del hormigón de la capa de rodadura .....	49
Fig. 3.20.- Fratasado del hormigón de la capa de rodadura .....	50
Fig. 3.21.- Carro para la aplicación del inhibidor de fraguado y primer líquido de curado: a) Vista general en zona abierta y b) detalle del extendido en túnel.....	51
Fig. 3.22.- Corte de juntas: a) Marcado de retícula, b) Corte juntas transversales, c) Profundidad juntas transversales y d) Aspecto de cruce de juntas .....	53
Fig. 3.23.- Apertura de una junta serrada .....	54
Fig. 3.24.- Juntas de final de jornada: a) Lámina protectora, b) encofrado transversal, c) eliminación de sobrante hormigón y d) acabado manual de la junta .....	55
Fig. 3.25.- Corrección de irregularidades superficiales .....	56
Fig. 3.26.- Excesiva distancia entre las dos extendedoras .....	57
Fig. 3.27.- Acabado de la capa de rodadura.....	58

## Capítulo 6

Fig. 6.1.- Diferentes estrategias de conservación de un firme: a) esquema usual (Kraemer, 2004) y b) esquema específico (Follía, 2010) .....	84
Fig. 6.2.- Conservación extraordinaria en carreteras G.C. (Follía, 2010) .....	85

Fig. 6.3.- Textura capa rodadura: a) inicial o de proyecto y b) prueba en HAC .....	92
---	----

## Capítulo 7

Fig. 7.1.- Ámbitos de la sostenibilidad .....	98
Fig. 7.2.- Zona afectada por una cierta carga .....	99
Fig. 7.3.- Radiación emitida a la atmósfera por hormigón, asfalto y suelo desprotegido (Asaeda, 1993).....	101
Fig. 7.4.- Relación entre reducción en la temperatura del pavimento y del aire (Kubo, 2006) .....	101
Fig. 7.5.- Energía total consumida para construir, mantener y rehabilitar diferentes tipos de pavimento (ASMI, 2006) .....	103
Fig. 7.6.- Evolución del: a) índice de confort de conducción y del b) índice de perfil de conducción (NSTPW, 1999) .....	107
Fig. 7.7.- Intensidad sónica en función de la textura superficial (ACPA, 2008) .....	109
Fig. 7.8.- Ejes que componen el análisis según la metodología MIVES (Villegas, 2009) .....	111

## Capítulo 8

Fig. 8.1.- Ubicación del tramo utilizado en la experiencia piloto .....	116
Fig. 8.2.- Secciones transversales: a) a cielo abierto y b) en túnel .....	117
Fig. 8.3.- Categorías de tráfico .....	118
Fig. 8.4.- Planta de distribución de pasadores, barras de atado y juntas. ....	121
Fig. 8.5.- Sección transversal juntas longitudinales(a), transversales (b), detalle de cajeo y biselado(c) .....	122
Fig. 8.6.- Centrales de hormigonado y camión volquete utilizado en el transporte .....	127
Fig. 8.7.- Limpieza base bituminosa .....	128
Fig. 8.8.- Cabrestante utilizado .....	128
Fig. 8.9.- Tramos del extendido .....	131
Fig. 8.10.- Cuchilla extendidora: a) antes del extendido y b) durante el extendido .....	132
Fig. 8.11.- Instalación de pasadores: a) equipo de instalación y b) pasadores instalados .....	133
Fig. 8.12.- Acumulación hormigón delante de la regla oscilante: a) correcta y b) excesiva .....	134





## Índice tablas

### Capítulo 2

Tabla 2.1.- Equivalencia de tráfico entre las normativas españolas y austriaca.....	12
Tabla 2.2.- Módulo de compresibilidad y deflexión patrón de las explanadas .....	13
Tabla 2.3.- Secciones mínimas de pavimento bicapa (en cm).....	14
Tabla 2.4.- Adecuación de la normativa austriaca a la normativa española (explanada E3) .....	16
Tabla 2.5.- Tipos de juntas .....	17
Tabla 2.6.- Característica de los pasadores y barras de atado .....	24
Tabla 2.7.- Requerimientos mínimos de coeficiente de luminancia difusa, factor de luminancia y coeficiente de luminancia retrorreflejada.....	31

### Capítulo 3

Tabla 3.1.- Equipo humano necesario y funciones del mismo.....	42
--	----

### Capítulo 4

Tabla 4.1.- Características exigidas de los áridos en función de la capa a la que pertenezcan.....	62
Tabla 4.2.- Tipos de aditivos de uso frecuente y características generales.....	63
Tabla 4.3.- Características exigidas de los hormigones del pavimento.....	64
Tabla 4.4.- Características exigidas a las distintas capas .....	66
Tabla 4.5.- Características exigidas para los componentes de unión de juntas.....	67
Tabla 4.6.- Características exigidas para los componentes de unión de juntas.....	68

### Capítulo 5

Tabla 5.1.- Características generales del control de la explanada, capa de regularización y materiales constituyentes .....	72
--	----

Tabla 5.2.- Clasificación del Índice de Regularidad Internacional .....	78
---	----

## Capítulo 6

Tabla 6.1.- Características de las actuaciones ordinarias de conservación.....	90
--	----

## Capítulo 7

Tabla 7.1.- Coste presente neto teniendo en cuenta operación de mantenimiento (FHWA, 2009).....	100
Tabla 7.2.- Ahorro de combustible y emisiones en el contexto español.....	104
Tabla 7.3.- Años hasta la primera rehabilitación y vida útil total.....	106
Tabla 7.4.- Distancia de frenado a una velocidad de 96 km/h (Ruhl, 1989).....	108
Tabla 7.5.- Ruido medido en diferentes tipos de pavimento (McNerney, 2000) .....	108
Tabla 7.6.- Árbol de toma de decisión, Villegas (2009) .....	113

## Capítulo 8

Tabla 8.1.- Datos básicos del Proyecto de demostración de firme rígido carretera C-17.....	118
Tabla 8.2.- Características de los materiales .....	123
Tabla 8.3.- Requerimientos de los hormigones de ambas capas .....	124
Tabla 8.4.- Dosificaciones empleadas para los hormigones de la capa de base y de la de rodadura.....	125
Tabla 8.5.- Rendimientos y consumos .....	136
Tabla 8.6.- Datos meteorológicos medios en los días 15, 16, 17 y 18 de Marzo de 2010.....	138
Tabla 8.7.- Valores de diversas propiedades de la explanada del tramo piloto .....	139
Tabla 8.8.- Resultados de los espesores de los testigos.....	141
Tabla 8.9.- Resultados del ensayo Marshall y de la granulometría de los áridos .....	141
Tabla 8.10. Resultados de los ensayos físico-químicos de los áridos .....	142
Tabla 8.11. Resultados de las granulometrías de los áridos.....	143
Tabla 8.12. Resultados de los husos granulométricos de los áridos .....	144
Tabla 8.13. Resultados de caracterización previa de hormigones .....	145
Tabla 8.14. Resultados del control de producción del hormigón de la capa de base (Laboratorio de obra de FCCSA-Portland Valderrivas) .....	146

Tabla 8.15. Resultados del control de producción del hormigón de la capa de rodadura (Laboratorio de obra de FCCSA-Portland Valderrivas) .....	147
Tabla 8.16. Contraste de los resultados del hormigón de la capa de base .....	148
Tabla 8.17. Contraste de los resultados del hormigón de la capa de rodadura .....	148
Tabla 8.18. Resumen de cumplimiento de IRI .....	152
Tabla 8.19.- Datos de CRT .....	153
Tabla 8.20.- Nivel de Sonoridad definido en Norma austriaca RVS 11066 .....	153
Tabla 8.21.- Nivel de sonoridad obtenido tras la corrección del CPX .....	154

## Capítulo 9

Tabla 9.1.- Especificaciones del árido usado en la capa superior .....	157
Tabla 9.2.- Especificaciones del árido usado en la capa inferior .....	158
Tabla 9.3.- Especificaciones de los productos filmógenos de curado .....	160
Tabla 9.4. Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm) .....	176
Tabla 9.5. Coeficiente multiplicador en función del número de amasadas .....	183



## PARTE A



# CAPÍTULO 1

## INTRODUCCIÓN

### 1.1.- ANTECEDENTES

Nadie discute la importancia que tienen las carreteras como infraestructura básica de un país. En el último siglo las tendencias básicas para resolver desde el punto de vista técnico estas carreteras han sido mediante *firμες flexibles*, formados por distintas capas, de rigidez decreciente en profundidad, tomando como ligante los materiales bituminosos, *firμες semirrígidos* constituidos por capas tratadas o estabilizadas con cemento o *firμες rígidos*, basados principalmente en soluciones de losas continuas de hormigón apoyadas directamente sobre la explanada. Además, en el ámbito internacional, existen intentos minoritarios de soluciones en base a prefabricados de hormigón (Ríos, 2010).

La implantación en la práctica de estas soluciones es muy diferente (Garber and Hoel, 2002) (Huang, 2004), en función de factores tales como: cultura técnica del país (más proclive a una solución u otra, como es el caso de los firmes rígidos en algunos estados de E.E.U.U., por ejemplo, California, o bien de Chile y Argentina, así como un nivel significativo en diversos países europeos, Alemania, Bélgica, Suiza, Austria, Francia, Gran Bretaña y otros), ubicación de la carretera (como puede ser el caso de carreteras de bajo tráfico para zonas rurales), momento histórico del país, como el caso de los pavimentos de las autopista alemanas construidas antes de la 2ª Guerra Mundial.



En España, los primeros tramos de ensayo de pavimentos de hormigón para carreteras datan, según Kraemer (1981), de 1915<sup>1</sup>, situándolos en Canarias y en la carretera de Barcelona a Santa Cruz de Calafell. Con posterioridad hay que resaltar las experiencias realizadas en el entorno de Sevilla. En este contexto hay que citar el Circuito de Firms Especiales<sup>2</sup>, al abrigo del cual se construyeron unos 40 km de pavimentos de hormigón, la mayoría de ellos en la N-II en las provincias de Lérida y Barcelona (del Val, 2007). Las posteriores guerras tanto en España como a nivel mundial, representaron una parada para todo tipo de actividades de desarrollo de infraestructuras.

Con el principio de la recuperación, en 1963, se construye un tramo de ensayo cerca de Madrid en la N-II, con distintos tipos de pavimentos (hormigón en masa, armado y pretensado), de diferentes características, para dar respuesta a un tráfico pesado. Los resultados de esta experiencia se recogen en Kraemer (1965).

Como consecuencia de estas experiencias se construyen algunos tramos posteriores como la Calle Pere IV en Barcelona (1964), la travesía de Manresa (1967) todavía en servicio sin mantenimientos significativos o la variante de Torrejón de Ardoz (1968), aunque no es hasta la década de los 70 cuando empiezan a emplearse de forma continua y en mayor escala. A esta época corresponden la autopista Sevilla-Cádiz, construida a partir de 1971 (en la que se emplea la experiencia californiana de losas cortas de hormigón en masa, vibrado, con encofrados deslizantes), diversos tramos de la autopista del Mediterráneo, en las zonas de Tarragona y Alicante, construidos entre 1973 y 1978, o la autopista Oviedo-Gijón-Avilés, construida a partir de 1975 (en la que se emplea un pavimento continuo de hormigón armado con la técnica californiana).

La razón del impulso en esa década puede responder, entre otros factores, a la denominada crisis del petróleo del año 1973, reflejada en España en los siguientes años, en los que se dio un impulso a soluciones que no fuesen dependientes del citado material. Esta misma crisis hizo que el sector cemento mejorase sus procesos de forma que se produjo un importante ahorro de energía, tal como puede verse en la figura 1.1 (Cardim, 2001), lo que, probablemente, favoreciese la implantación, al poder ser más competitiva la solución del pavimento rígido. En definitiva, aquella gran crisis dio por bueno una frase muy extendida de que las crisis son momentos de oportunidades, lo cual debe tenerse presente en las actuales circunstancias económicas.

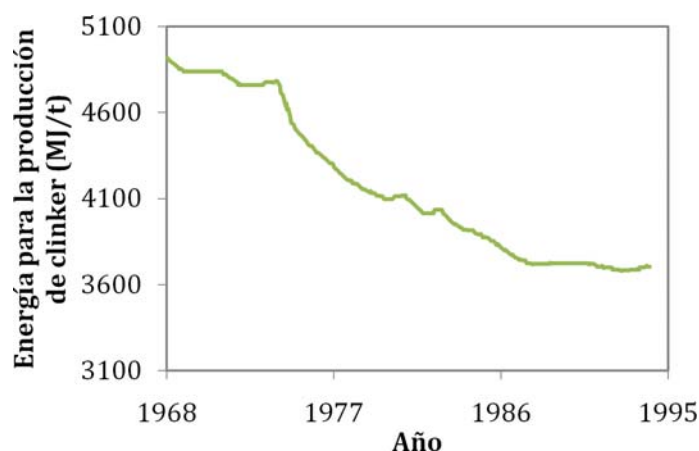
En la década de los años 1980, dentro del contexto del Plan General de Carreteras 1984-1991, se realizan diversos tramos en las autovías de Andalucía, Aragón y Levante, empleando entendedoras de encofrados deslizantes, si bien en algún caso con resultado no

---

<sup>1</sup> Hace referencia a una ponencia de Manuel Aguilar López en el 4º Congreso Mundial de Carreteras (Sevilla, 1923). De este mismo autor existen numerosos e interesante artículos en la Revista de Obras Públicas, en los que ya se incluyen los denominados pavimentos de hormigón de cemento portland con una identidad propia.

<sup>2</sup> Éste fue creado por un real decreto-ley de 9 de febrero de 1926, siendo Ministro de Fomento D. Rafael Benjumea Burín, Conde de Guadalhorce.

totalmente satisfactorio (del Val, 2007), especialmente en lo que hace referencia a la regularidad superficial



*Figura 1.1.- Evolución del consumo energético para obtener una tonelada de clinker en los últimos 40 años (Cardim, 2001)*

Como dicho autor señala, al finalizar 1995 se disponía en España de 1.600 km de calzada de dos carriles con pavimento de hormigón, si bien en ese periodo se produjo una parada significativa, la cual se mantiene, de realizaciones en el campo de carreteras, si bien su actividad es pujante en otros tipos de pavimentos: industriales, puertos, aeropuertos, vías secundarias, etc.

En cualquier caso, todas las experiencias señaladas eran fundamentalmente de una solución monocapa de hormigón estructural, sin plantearse soluciones bicapas, una de ellas (la superior) con función de capa de rodadura. En esta línea hay que señalar una experiencia piloto en un ramal de la M-50 en Madrid, dentro del marco de un proyecto europeo<sup>3</sup>, en el que se utilizaba un hormigón compactado con rodillo y una capa de rodadura de hormigón poroso modificado con polímeros. Algunos de los resultados del proyecto, especialmente los referentes al hormigón poroso se recogen en Aguado (1997). Una ampliación sobre pavimentos permeables puede verse en Scholz y Grabowiecki (2007).

Con la citada técnica de hormigón compactado con rodillo se realizaron numerosas experiencias, tanto en obra nueva como en refuerzos de pavimentos existentes. Entre estas experiencias cabe señalar: refuerzo de la carretera V-604 de Bétera a Olocau (Comunidad Valenciana) en 1984, el Túnel del Cadí (Cataluña) en 1984, diversos tramos de la Autovía A4 (Valdepeñas-Almuradiel y Villaverde – Seseña en Castilla-La Mancha), en 1987 y la Autovía A92, en el tramo Archidona-Granada (Andalucía) en 1991.

<sup>3</sup> *Optimization of the Surface Properties of Concrete Roads in Accordance with Environmental Acceptance and Traffic Safety.* (C.E.). Programa BRITE-EURAM. BE nº. 3415. Años 1990 a 1994. Por parte española estuvieron implicados Dragados y Construcciones, S.A., Geocisa, IECA y la UPC

En años posteriores se avanza tanto en el conocimiento (Kramer y del Val, 1993) como en las experiencias de pavimentos continuos de hormigón armado (Jofre, 2008), incidiendo en aspectos específicos como: color y textura (Jofre *et al.* (2003)), fuego en túneles (Jofre *et al.* (2010)), pavimentos de baja intensidad de tráfico (Josa *et al.* (2003)) u otros campos, por ejemplo, pavimentos industriales (Jofre y Vaquero (2000)).

Las razones de ese limitado empleo de los firmes de hormigón en nuestro país, son antiguas (Balaguer y Fernández, 1973) y pueden responder a diversos factores, tales como:

- De tipo cultural, representada por una gran inercia al cambio, existentes en el sector de la construcción y en los técnicos. Ello puede venir favorecido por una cierta mayor rigidez de los procesos constructivos, a lo que se añade la inercia al cambio de maquinaria.
- Económicos, con una visión a corto plazo, ya que si bien los pavimentos de hormigón tienen unos mayores costes de implantación, aunque competitivos, hace que se valore insuficientemente, los inferiores costes capitalizados, incluyendo los de explotación a largo plazo.
- Imprecisiones en la técnica utilizada, reflejada principalmente en incorrecciones del acabado y, en mucho menor medida, algunos daños estructurales.
- Percepción inadecuada del usuario con respecto al tema del confort acústico dentro del vehículo a elevadas velocidades a igualdad de condiciones de mantenimiento y rodadura.

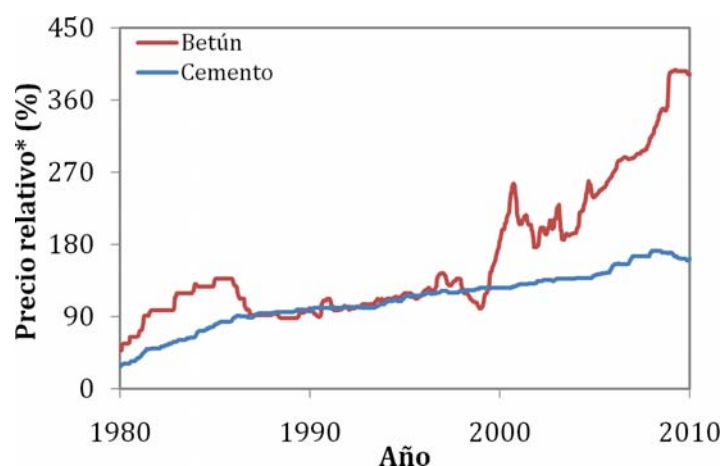
El cambio de mentalidad social hace necesario volver la vista a este tipo de alternativas, si bien intentando mejorar algunas de las dificultades señaladas con anterioridad, teniendo presente la evolución de nuestra sociedad hacia temas de sostenibilidad, en sus tres vertientes: económica, social y medioambiental.

Desde el punto de vista económico, no hay que olvidar el importante grado de dependencia que España tiene del petróleo y de la evolución de los precios del mismo. En la figura 1.2 se muestra la evolución de los precios del betún (como derivado del petróleo) y del cemento tomando como referencia el año 1990, disponible en la base pública de información del Ministerio de Fomento<sup>4</sup>. En ella puede observarse que las diferencias de crecimiento de ambos productos son muy significativas, por lo que abre la vía a los pavimentos de hormigón para que, desde el punto de vista económico, cada vez sean más competitivos.

---

4

<http://www.fomento.es/MFOM/LANGCASTELLANO/INFORMACIONMFOM/INFORMACIONESTADISTICA/Construccion/IndiceCostes/default.htm>.



\*Nota: El precio relativo se calcula dividiendo el precio de los materiales en cada año por su precio en 1990.

*Figura 1.2.- Evolución de los precios del betún y del cemento en los últimos 30 años  
(Ministerio de Fomento)*

Desde el punto de vista social, hay que tener presente tanto los aspectos de seguridad de la vía, como el confort del conductor y, desde el punto de vista ambiental, la reducción de la contaminación acústica del entorno. En consecuencia se deben mejorar acabados de experiencias anteriores, tal como se ha dicho, y aproximarlos a soluciones de firmes flexibles, mejor aceptados por los usuarios, ya que a la luz de la tecnología actual las características acústicas iniciales y a medio plazo son algo inferiores en los pavimentos rígidos.

Los pasos a dar deben encaminarse en esa dirección y, consecuentemente, mejorar la textura del acabado y la regularidad superficial de la capa de rodadura, dando por sentado que actualmente se puede diseñar hormigones que tanto desde el punto de vista resistente como funcional den respuesta satisfactoria a las exigencias planteadas. Asimismo, como en los precedentes de los años 20 y 60 citados, es recomendable, realizar tramos pilotos que sirvan de referencias posteriores de esta técnica y, por último, y no menos importante, formar a los técnicos en esta solución, cara a romper las inercias, anteriormente señaladas.

Ahora bien, no sólo son las circunstancias actuales las que deben servir de motor de cambio o pensamiento, sino las circunstancias futuras. En consecuencia, ese análisis debe plantearse, tal como señala Polimón (2008) siguiendo los tres principios básicos de la innovación: desarrollo sostenible, aumento de competitividad y generación y gestión del conocimiento.

## 1.2.- OBJETIVOS

El objetivo del presente documento es servir de manual para el empleo de una nueva técnica de pavimentos bicapa de hormigón, la capa inferior con función resistente y

la superior (capa de rodadura), aparte de la función resistente, la de funcionalidad a través de la regularidad superficial y la textura, mediante el denudado superior de dicha capa.

Este manual va dirigido a los técnicos intervinientes en cada una de las etapas del proceso, entendiendo por tales: concepción, proyecto, materiales, ejecución, control y gestión de la carretera. En el planteamiento, no sólo se incide en cómo hay que hacer cada paso sino que se intenta prevenir los problemas que puedan aparecer y, en el caso de que aparezcan, se señalan las medidas correctoras adecuadas para resolverlos.

Asimismo, el documento tiene por objetivo presentar la experiencia pionera realizada en España, correspondiente a un tramo de un pavimento bicapa de hormigón realizado en el eje Vic – Ripoll de la carretera C-17 en Cataluña. Como consecuencia de estos objetivos se presenta un Pliego de Condiciones que sirva de base para futuros proyectos de estas características.

### 1.3.- METODOLOGÍA SEGUIDA

Para dar respuesta a estos objetivos el documento se estructura en dos partes claramente diferenciadas. Una primera que contiene las bases teóricas de la propuesta, estructurada en diferentes capítulos, hasta el capítulo 7, que abarca cada una de las etapas antes señaladas y una segunda parte, más práctica donde se desarrolla la solución adoptada en la experiencia piloto del tramo Vic Ripoll de la carretera C-17 (capítulo 8) así como el Pliego de Condiciones cara al futuro (capítulo 9), para terminar con las conclusiones más relevantes del trabajo (capítulo 10).

Hay que tener presente que este documento nace con la voluntad de mejorar y retroalimentarse en base a nuevas experiencias y, en sí mismo constituye una experiencia piloto, dada las limitaciones de publicaciones de este tipo existentes en el ámbito nacional. En base a ello, el tiempo que se ha dispuesto para esta primera edición ha sido limitado, ya que se ha primado el criterio de oportunidad y de espejo hacia nuevas experiencias.

Por otro lado, hay que encuadrar este documento en el enfoque prestacional, hacia el que se están derivando en los últimos años, las normativas, por ejemplo, la reciente Instrucción del Hormigón Estructural EHE08 (M.F., 2008). En el documento se pretende no sólo decir cómo hacer las cosas en este nuevo procedimiento, sino lo que es más importantes, que actitud seguir para conseguirlo, poniendo énfasis en los aspectos más relevantes. Este procedimiento si está bien ejecutado da respuesta satisfactoria a las prestaciones requeridas para pavimentos equivalentes resueltos con otras soluciones.

Para la elaboración de este documento se ha configurado un equipo de técnicos (Antonio Aguado, Sergio Carrascón, Sergio Cavalaro, Ivan Puig y Corpus Senés) procedentes, principalmente del ámbito del hormigón e ingeniería civil, coordinado por el profesor Antonio Aguado, dentro del contexto de la Universidad Politécnica de Cataluña.

Asimismo se ha contado con una Comisión de Seguimiento que ha participado activamente tanto en la supervisión del documento como en los propios trabajos de planificación y realización de la experiencia concreta. Estos técnicos son, por parte de:

- FCC Construcción S.A.: Javier Ainchil.
- IECA: Sergio Carrascón.
- UPC: Alejandro Josa.
- Cementos Portland Valderrivas: Ignacio Machimbarrena.

El trabajo realizado se ha presentado a una comisión de técnicos de la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Catalunya (DGGC) y de Gestora d'Infraestructures S.A. (GISA), que han supervisado con profundidad la versión final del documento, a los que se agradece profundamente sus valiosas contribuciones y sugerencias.

Por último, asimismo se agradece a CEDINSA, que haya prestado la oportunidad de realizar el tramo experimental. Para la innovación se requiere una voluntad política y empresarial para avanzar en esa dirección, lo cual ha puesto de manifiesto de forma generosa CEDINSA en esta ocasión. Gracias



## CAPÍTULO 2

### PROYECTO

#### 2.1.- INTRODUCCIÓN

Una definición, aunque antigua, bien establecida de un firme de hormigón es la propuesta por Balaguer y Fernández (1973), en la que se señala que:

*Un firme de hormigón está constituido, por una capa de hormigón hidráulico de calidad homogénea, que se apoya sobre capas de suelo natural, material granular o estabilizado con algún aditivo, cuya misión es proporcionar a las losas de hormigón un cimiento uniforme y estable. Estas losas por si mismas tienen casi toda la misión resistente respecto al tráfico, y las tensiones que transmiten al cimiento son pequeñas.*

Independientemente de las características técnicas de estas losas (losas cortas de hormigón en masa o armadas, losas continuas de hormigón armado, etc.), cabe señalar que, salvo actuaciones muy puntuales y excepcionales señaladas en el capítulo anterior, las aplicaciones o realizaciones han sido con losas monocapa, esto es, todo el hormigón de la losa era de las mismas características.

Con este planteamiento, a la parte superior de la losa, se la ha dado diversos tipos de textura, principalmente, con un peinado del hormigón en fresco, ya sea en dirección transversal, longitudinal o mixto. Ello conduce a una rugosidad que siendo positiva por razones de seguridad, a veces, puede ser poco confortable al conductor, por razones acústicas.



En consecuencia, en España no existen experiencias significativas de firmes con losas bicapa de hormigón construidas con dos hormigones diferentes, asociados a las características requeridas a cada una de ellas. No obstante, ello no lo impide la normativa española vigente<sup>2</sup> que deja la puerta abierta a las losas bicapa. La experiencia en esta dirección en el ámbito internacional, si bien es mayor que la nuestra, principalmente, en los países del norte o centro de Europa, aunque se está abriendo camino en la actualidad.

Desde el punto de vista de diseño, el mismo suele basarse en modelos materiales y estructurales simplificados (Hall et al., 1997). además de un gran número de guías obtenidas a partir de la experiencia práctica (Rollings, 2005). Si bien esas guías tratan de pavimentos rígidos de forma genérica, existe poca información específicamente sobre el proyecto de pavimentos bicapa de hormigón.

A la luz de la información reflejada previamente, este manual incorpora la experiencia de ejecución de pavimentos bicapa de hormigón especialmente la experiencia austriaca<sup>1</sup>. Ello no quita para que, a lo largo del documento, se mantengan las directrices comunes o generales recogidas en las normativas españolas<sup>2</sup>, en los aspectos de carácter general, por ejemplo, tráfico, tipos de explanada, etc.

El objetivo del presente capítulo es hacer una propuesta de actuación, desde el punto de vista de proyecto, de pavimentos bicapa de hormigón, que tengan un carácter general, si bien muy apoyadas en la experiencia piloto realizada en la carretera C-17 de Vic a Ripoll.

## 2.2.- DISEÑO ESTRUCTURAL

Un pavimento de hormigón (independientemente de si es mono o bicapa) es básicamente una losa apoyada en una capa de base de reparto, en general, menos rígida que la losa de hormigón. Cabe recordar que desde el punto de vista estructural conviene que exista una transición razonable de rigideces, cara a compatibilizar las deformaciones de cada uno de los sistemas (losa estructural, capa de base y explanada)

En la normativa española, esta capa base está constituida por una capa de hormigón magro de 15 cm para los tráfico T00, T0, T1 y T2, mientras que en la normativa austriaca citada esta capa está formada por 5 cm de mezcla bituminosa junto a una capa de coronación de la explanada de suelo estabilizado con cemento de 20 cm para los tráfico S, I y II y de 18 cm para el tráfico tipo III.

---

<sup>1</sup> Instrucción austriaca de firmes (RVS 08.17.02)

<sup>2</sup> Instrucción española 6.1-IC sobre Secciones de firmes

Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carreteras y Puentes (PG3).

La configuración descrita implica un comportamiento similar a una viga a flexión (ACPA, 2008), aunque la losa de hormigón es más ancha y, en consecuencia debería considerarse una placa, tal como señala Mallick y El-Korchi (2009). Por ello desde el punto de vista estructural, desde el inicio (Westergaard, 1926a y 1926b) planteaba el comportamiento de una placa de hormigón apoyada en unos muelles que reflejase una cimentación tipo Winkler.

Con posterioridad y, con el importante avance de los métodos numéricos, es posible estudiar el comportamiento de cualquier pavimento, en circunstancias complejas, si bien no se suele utilizar los mismos en el dimensionamiento estándar, siguiéndose el empleo de métodos empíricos basados en las experiencias nacionales e internacionales. Ello puede responder, por un lado, al buen hacer de la experiencia y, por otro lado, a que con frecuencia se consideran los pavimentos como el hermano pobre de las estructuras, olvidando que son estructuras, en las que el riesgo de rotura conlleva, usualmente, a daños menores, en lo que hace referencia a vidas humanas. En este documento se sigue el planteamiento empírico.

Desde el punto de vista estructural, el planteamiento debe seguir la filosofía de los estados límites, en el que se cumpla que:

$$\text{Solicitud (S)} \leq \text{Respuesta (R)} \quad [2.1]$$

considerando entre las solicitaciones (S), principalmente, las originadas por las cargas de tráfico y las deformaciones impuestas de tipo térmico o reológico (por ejemplo retracción diferencial entre fibras), y, en menor medida, el peso propio, y la combinación de ambos tipos. En el caso de pavimentos de hormigón pretensado, debería incluirse la acción del pretensado.

Para conocer la respuesta (R), no solo hay que conocer las características de los materiales a emplear, pensando en el análisis seccional, sino también de las condiciones de apoyo, pensando en el análisis estructural, en definitiva, se requiere conocer las características de la explanada. En ese contexto, cabe matizar que el fallo de los pavimentos muchas veces se produce a raíz de solicitudes que, a pesar de no superar de forma instantánea la capacidad resistente del material, presentan una variación cíclica capaz de causar su fatiga en el tiempo.

Desde el punto de vista estructural, un aspecto relevante que introducen los pavimentos de hormigón, es la propia conexión de las losas para que exista una contribución estructural del conjunto de losas, tanto longitudinal, como transversalmente, entre otras cosas para evitar los riesgos del fenómeno conocido como bombeo de finos. En este caso adquiere relevancia tanto los pasadores que conectan juntas transversales, como las barras de atado que conectan juntas longitudinales. En consecuencia, dichos elementos deben proyectarse para dar la respuesta necesaria y construirse y colocarse adecuadamente, para asegurar el comportamiento previsto. En lo que sigue se hace una revisión de los factores principales tanto de la solicitud como de la respuesta.

### 2.3.- CATEGORÍA DE TRÁFICO PESADO

El dimensionamiento del pavimento se hace en función de las acciones de tráfico, consideradas en la normativa española 6.1-IC que especifica la **Intensidad Media Diaria de vehículos pesados (IMDvp)** con ejes equivalentes de 13 t. Ahora bien, para hacerlo compatible con la experiencia austriaca en la que se apoya el manual es necesario hacer una equivalencia entre ambas normativas ya que el eje en la normativa austriaca es de 10 t. El factor de equivalencia del eje austriaco (10 t), con respecto al eje utilizado en la normativa española (13 t) es de 0,35. En ambos casos el periodo de proyecto que se considera es de 30 años.

En la tabla 2.1 se muestra estas equivalencias habiendo considerado para los cálculos de número de ejes totales de 13 t, el valor máximo de los rangos dados para la IMDvp en el caso de la normativa española (con una tasa de crecimiento del 3,00 %) y del nº de ejes totales de 10 t. En ella se aprecia un desplazamiento de la escala, no contemplando la normativa austriaca los tráficos T00 y T0 de la normativa española.

Normativa	Categoría de tráfico	IMDvp	Nº ejes totales 13 t	
Española	T00	> 4.000	121.555.187	
	T0	2.000-3.999	69.442.742	
	T1	800-1.999	34.712.688	
	T2	200-799	13.874.656	
	T31	100-199	3.455.640	
	T32	50-99	1.719.138	
	T41	25-49	850.886	
	T42	<25	434.126	
Normativa	Categoría de tráfico	Nº Ejes totales de 10 t	Nº ejes totales 13 t	Equivalencia
Austriaca	S	18.000.001-40.000.000	14.005.112	T1/T2
	I	6.500.001-19.000.000	6.302.300	T2/T31
	II	2.100.001-6.500.000	2.275.831	T31/T32
	III	600.001-2.100.000	735.268	T32/T41/T42
	IV	150.001-600.000	210.077	T42
	V	75.001-150.000	52.519	
	VI	0- 75.000	26.260	

Tabla 2.1.- Equivalencia de tráficos entre las normativas españolas y austriaca

### 2.4.- CARACTERÍSTICAS DE LA EXPLANADA

El desempeño del pavimento con respecto a la estabilidad, la capacidad portante y la consolidación con el paso del tiempo depende, en gran medida, de la explanada en la que se asienta la estructura. Al contrario de los pavimentos flexibles, los pavimentos bicapa de hormigón permiten una distribución más uniforme de las cargas en la

explanada, la cual pasa a afectar menos el comportamiento de la estructura. Por consiguiente, se reduce la necesidad de emplear bases o capas intermedias con materiales muy rígidos o estabilizar la explanada, con excepción de sitios expuestos a cargas muy elevadas.

Para el caso específico de los pavimentos de hormigón, los parámetros más relevantes son la calidad de soporte de la explanada, además de la susceptibilidad a la humedad y al efecto de hielo y deshielo de la misma. De acuerdo con algunos métodos de diseño corrientes, el espesor de los pavimentos rígidos se encuentra poco influenciado por el módulo de reacción de la explanada si se compara con los pavimentos flexibles.

Por otro lado, la consideración de la susceptibilidad a la humedad y al efecto de hielo y deshielo en proyecto suele hacerse en función del tipo de tráfico. En pavimentos expuestos a cargas elevadas, se recomienda la remoción de cualquier tipo de material inestable encontrado, tal y como son los limos, las turbas y los suelos con alto contenido de material orgánico (Kohn, 2003). En los casos en que el uso y la viabilidad lo permitan, se puede mejorar la capacidad portante del suelo y reducir el entumecimiento debido a la humedad a través de procesos de estabilización.

Las explanadas se clasifican en tres categorías en función de los valores del módulo de compresibilidad obtenidos en el segundo ciclo de carga del ensayo de carga con placa (NLT-357/98). La tabla 2.2 muestra el módulo de compresibilidad y la deflexión patrón exigida para las 3 categorías de explanada según define la norma 6.1- IC.

Categoría de explanada	Módulo de compresibilidad en el segundo ciclo $E_{v2}$ (MPa)	Deflexión patrón exigida (mm)
E1	$\geq 60$	$\leq 2,50$
E2	$\geq 120$	$\leq 2,00$
E3	$\geq 300$	$\leq 1,25$





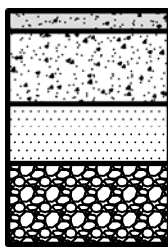



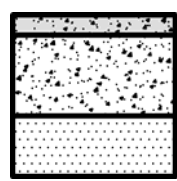
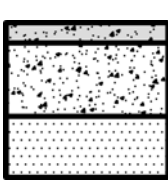
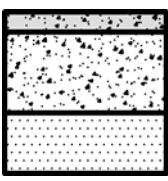
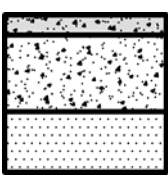
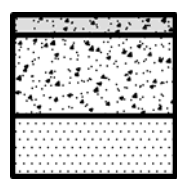
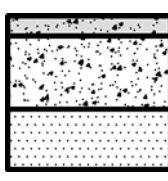
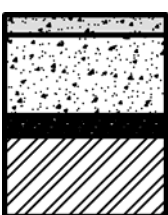
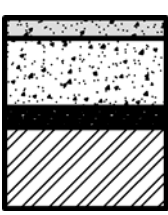
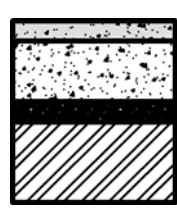
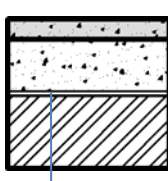
*Tabla 2.2.- Módulo de compresibilidad y deflexión patrón de las explanadas*

## 2.5.- SECCIONES DE HORMIGÓN

Los factores de diseño a considerar en el dimensionamiento de un firme son el tráfico que éste ha de soportar en su período de proyecto, la capacidad de soporte de la explanada sobre la que se apoyará el paquete de firme y las características mecánicas de los materiales que constituyen las distintas capas de firme y explanada. El proceso de dimensionamiento consiste en un cálculo del estado tenso-deformacional de las capas del firme que induce el paso de una carga patrón y un cálculo a fatiga de las diferentes capas en función de las tensiones o deformaciones inducidas por el paso de la carga.

Recomendaciones sobre número y espesor mínimo de capas en las secciones de firmes están presentes en diversas normas internacionales, de entre las cuales la austríaca

se considera como de referencia en los pavimentos bicapa de hormigón. La norma española 6.1-IC también incluye un catálogo de secciones de firme para el dimensionamiento de éstos en los proyectos de carreteras. En ese caso, la definición de las secciones se hizo a partir de un procedimiento que tiene en cuenta las relaciones entre las intensidades de tráfico pesado y los niveles de deterioro admisibles al final de la vida útil del firme. Los resultados se presentan en la tabla 2.3 para ambas normativas.

Normativa española				
Categoría de explanada	Categoría Tráfico (CT)			
	T00	T0	T1	T2
	 Capa de rodadura de hormigón  Capa de base de hormigón  Hormigón magro vibrado  Mezcla bituminosa			 5 18 15 20
	 Mezcla bituminosa  Suelo estabilizado con cemento  Zahorra artificial		 5 20 15	 5 18 15
	 5 20 15	 5 19 15	 5 20 15	 5 18 15
Normativa austriaca				
Categoría de explanada	Categoría Tráfico (CT)			
	S (aprox. T1)	I (aprox. T2)	II	III
	 4 21 5 20	 4 18 5 20	 4 16 5 20	 4 14 18 Nota 3

Nota: (1) Para categorías de tráfico pesado T00 y T0 con explanada E3 se deben emplear pavimentos continuos de hormigón armado; (2) La capa superior de la explanada E2 debe estabilizarse con cemento. (3) Tratamiento superficial

Tabla 2.3.- Secciones mínimas de pavimento bicapa (en cm)

Tal y como puede apreciarse en la tabla 2.3, la instrucción española considera para todas las categorías de tráfico y de explanada una capa intermedia de hormigón magro de 15 cm de espesor con función de regularización y soporte; mientras que en la normativa

austriaca, las mismas funciones son desempeñadas por la capa de coronación de la explanada que se debe estabilizar con cemento y la capa de mezcla bituminosa que, con excepción del firme correspondiente a la categoría de tráfico pesado III, presentan 20 cm y 5 cm de espesor. En ese caso, la presencia de la capa de mezcla bituminosa tiene el valor añadido de evitar que el agua que se infiltra por las juntas dañe la explanada y disminuya su capacidad soporte, comprometiendo la durabilidad del firme. El espesor final de la capa intermedia es un 67% mayor en la instrucción austriaca, lo que se justifica por la menor capacidad portante de los materiales empleados en esa última.

La aplicación de la técnica de pavimento bicapa de la normativa austriaca a la normativa española admite tres vías alternativas de actuación, que son:

- A. Adaptar el catálogo de la instrucción 6.1 IC a la técnica bicapa
- B. Extender el catálogo de la instrucción austriaca a los tráficos españoles
- C. Solución intermedia: igual a la 1ª opción, añadiendo los 5 cm de mezcla bituminosa debajo del hormigón magro y el hormigón de base no armado.

A continuación se describen los pavimentos bicapa dimensionados en cada una de esas opciones. Inicialmente se define la opción A de acuerdo con la tabla 2.3 y se calcula la deflexión transmitida por esta a la explanada. Con posterioridad se precede al dimensionamiento de las secciones en las opciones B y C que transmiten a la explanada la misma deflexión previamente calculada para cada tráfico.

En la opción A, el espesor de la capa de hormigón estructural se dividiría en 5 cm de la capa de rodadura y el resto de capa de base. Esta opción tiene como inconveniente, que desvirtúa en cierta medida la técnica austriaca, ya que no existen los 5 cm de la mezcla bituminosa que se sustituyen por 15 cm de hormigón magro (HM) para los tráficos T00, T0, T1 y T2. Además, la capa de base para T00 y T0 debería ser de hormigón armado continuo. Este planteamiento encarece la sección y dificulta la puesta en obra. Entre las ventajas de este planteamiento es que representa una adaptación directa de la instrucción española de fácil implantación para las administraciones.

En la opción B los espesores de hormigón se dividirían en 5 cm de capa de rodadura (HR) y el resto de capa de base (HB). Asimismo se emplea una capa con 5 cm de mezcla bituminosa (HB) que se asiente sobre la capa de coronación de la explanada. Esta opción tiene como inconveniente el aumento de espesor del pavimento bicapa, el cual podría llegar a 41 cm en el caso de T00 (desglosados en 5HR+36HB), 34 cm en el caso T0 (5HR+29HB) y 31 cm en el caso T1 (5HR+26HB), lo cual puede dificultar la implementación para las administraciones. Entre las ventajas de este planteamiento se encuentra que se sigue la filosofía de la solución austriaca y evita el uso de hormigón armado continuo lo que, consecuentemente, abarata la sección y facilita la puesta en obra.

En la *opción C* al igual que en la primera opción, los espesores de hormigón se dividirían en 5 cm de capa de rodadura y el resto de capa de base. Esta opción tiene como inconveniente, que aumenta el espesor del pavimento bicapa hasta 26 cm en el caso T00 (5HR+21HB), 25 cm en el caso T0 (5HR+20HB) y 23 cm en el caso T1 (5HR+18HB), manteniendo los 15 cm de hormigón magro, lo que evidentemente encarece la sección. Entre las ventajas de este planteamiento se encuentra que se sigue parcialmente la filosofía de la solución austriaca y evita el uso de hormigón armado continuo, lo que facilita la puesta en obra y, consecuentemente, puede ser mucho más fácil de implementar para las administraciones. En la tabla 2.4 se presentan los resultados de las tres opciones para el caso de la explanada E3.

Tráfico	Opción 1	Opción 2	Opción 3
<b>T00</b>	5HR+20HAC+15HM	5HR+36HB+5MB	5HR+21HB+15HM+5MB
<b>T0</b>	5HR+19HAC+15HM	5HR+29HB+5MB	5HR+20HB+15HM+5MB
<b>T1</b>	5HR+20HB+15HM	5HR+26HB+5MB	5HR+18HB+15HM+5MB
<b>T2</b>	5HR+18HB+15HM	5HR+20HB+5MB	5HR+16HB+15HM+5MB

Tabla 2.4.- Adecuación de la normativa austriaca a la normativa española (explanada E3)

Cabe matizar que la instrucción austriaca recomienda un mínimo de 4 cm para la capa de rodadura. Sin embargo, en la tabla 2.4, se ha optado por incrementar en 1 cm este espesor (con lo que se llega a los 5 cm) dado que en España los gradientes térmicos suelen ser más elevados que en la zona centro-europea de referencia, lo que puede contribuir a un mayor riesgo de despegue de la capa superficial por los esfuerzos tangenciales generados debidos a los incrementos de temperatura.

A manera de ejemplo, en la figura 2.1 se presenta la solución adoptada para la experiencia piloto de la carretera C-17, con un firme de hormigón bicapa de acuerdo con la normativa austriaca para la categoría de tráfico máxima S (equivalente a una T1 de la normativa española) y para una explanada E3.

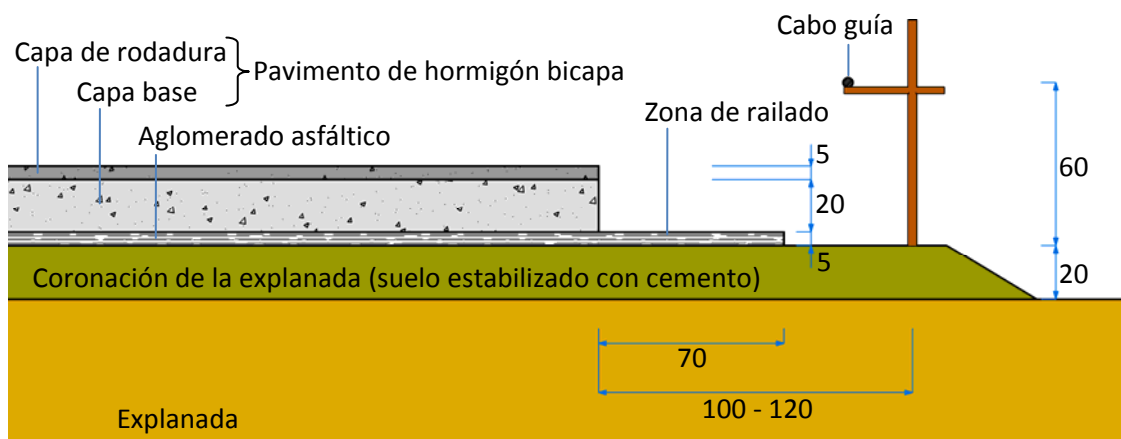


Figura 2.1.- Esquema de la plataforma utilizada en la experiencia piloto de la C-17 (en cm)



De acuerdo con la tabla 2.3, anteriormente presentada, esta sección está conformada por 25 cm de pavimento bicapa, apoyado sobre la capa de coronación de la explanada formada por 20 cm de suelo estabilizado con cemento. Entre ambas capas se dispone 5 cm de mezcla bituminosa en caliente.

## 2.6.- ASPECTOS ESPECÍFICOS DE PROYECTO

### 2.6.1.- Juntas

Las juntas, según su posición con respecto a la calzada, se dividen en tres tipos: longitudinales (paralelas al eje de la calzada), transversales (perpendiculares al eje de la calzada) y de expansión. Estas juntas se clasifican dependiendo de su función principal como muestra la tabla 2.5. Cabe matizar que las juntas practicadas en los pavimentos bicapa de hormigón deben atravesar la capa de rodadura llegando a la capa base.

Junta	Tipo	Espaciado	Conexión	Función
Transversal	Contracción	< 4 m (sin pasador) < 5 m (con pasador)	Ninguna o con pasador	Controlar la fisuración provocado por la retracción causada por los cambios de temperatura y de humedad
	Construcción	De acuerdo con proceso constructivo	Con pasador o con barra de atado	Compatibilizar comportamiento de diferentes loas producidas por la interrupción del proceso constructivo
Longitudinal	Contracción	< 5 m	Con barra de atado	Controlar la fisuración provocado por la retracción causada por los cambios de temperatura y de humedad
	Construcción	De acuerdo con proceso constructivo	Con barra de atado	Compatibilizar comportamiento de diferentes loas producidas por la interrupción del proceso constructivo
Expansión	Expansión	Localizados cerca de elementos fijos en la vía (por ejemplo estribos de puente)	Con pasador adaptado	Limitar tensiones debido a la variación de temperatura o cerca de elementos fijos en la vía

Tabla 2.5.- Tipos de juntas

La fisuración en pavimentos se presenta por la combinación de varios efectos, entre los que cabe señalar la retracción por secado del hormigón, los cambios de humedad y de temperatura, la aplicación de las cargas del tráfico y por ciertas características de los materiales empleados. La adecuación del sistema de juntas se mide por su capacidad de controlar la fisuración que ocurre de manera natural en el pavimento de hormigón sin dejar que ello repercuta en las prestaciones del pavimento y en la percepción del usuario. Además, las juntas tienen funciones más específicas, como dividir el pavimento en incrementos prácticos para la construcción, absorber los esfuerzos provocados por los



movimientos de las losas, proveer gracias a los pasadores una adecuada transferencia de carga y dar forma al depósito para el sellado, si éste se realiza.

### 2.6.1.a.- Junta transversal de contracción

Las juntas transversales de contracción están construidas en sentido transversal al tráfico, usualmente sesgadas, con una inclinación respecto al eje de la calzada de 6:1, tal y como muestra la figura 2.2.a. Las mismas sirven para controlar la fisuración provocada por la retracción causada por los cambios de temperatura y de humedad en el hormigón.

Con ello, se pretende que las ruedas de la izquierda de cada eje atraviesen la junta antes que las de la derecha, lo que reduce la transmisión dinámica de cargas entre losas contiguas (ya que no hay pasador). Por otro lado, para las categorías de tráfico pesado T1 y T2, las juntas transversales de contracción se proyectan con pasadores, siendo en ese caso normales al eje de la carretera, respetando una distancia máxima de 5 m entre juntas (figura 2.2.b).

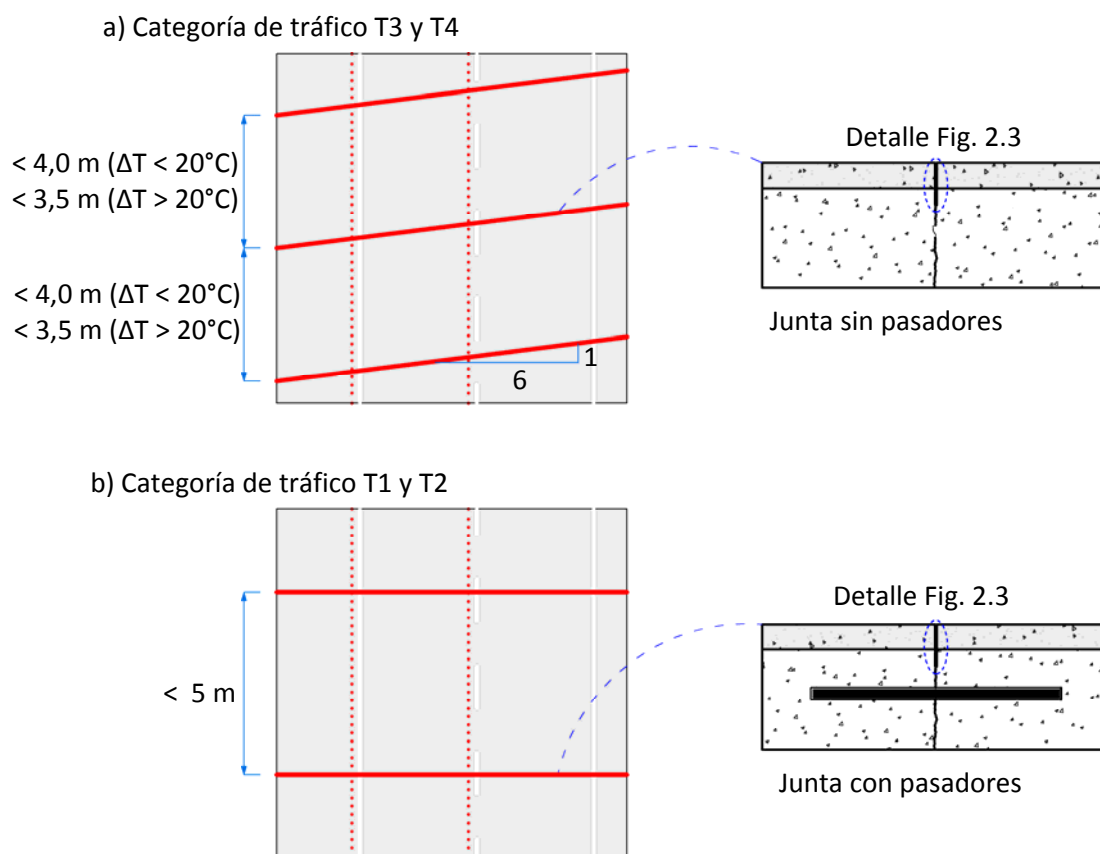


Figura 2.2.- Junta transversal de contracción

El espaciamiento entre juntas transversales de contracción se calcula a través de la regla práctica dada por la ecuación 2.1, con un valor igual al espesor del pavimento. Normalmente se utiliza 20 en la ecuación cuando hay mayor rozamiento entre la capa

intermedia y el pavimento de hormigón, como ocurre en bases estabilizadas o en bases con textura muy cerrada. El valor de 25 se utiliza cuando el rozamiento entre la capa intermedia y el pavimento presenta valores normales, como ocurre en bases granulares.

$$S_{juntas} = (20 \text{ hasta } 25) * e \quad [2.1]$$

La norma 6.1-IC indica que, para las categorías de tráfico pesado T3 (T31 y T32) y T4 (T41 y T42), se podrán proyectar juntas transversales de contracción sin pasadores a una distancia no superior a 4 m, la cual se reducirá a 3,5 m en las zonas donde las oscilaciones diarias de la temperatura ambiente sean superiores a 20° C.

Las juntas transversales de contracción generalmente se realizan por entalla con disco de diamante con el hormigón en estado endurecido, lo que permite un mejor control de la forma de la junta. La ejecución con el hormigón en estado fresco mediante cuchillo vibrante o por inserción de tira plástica debe evitarse en las vías con elevada intensidad de tráfico dado que puede dar lugar a imperfecciones geométricas difíciles de controlar. La figura 2.3 muestra el detalle de la junta transversal que puede ser de formato simple o con cajeadado.

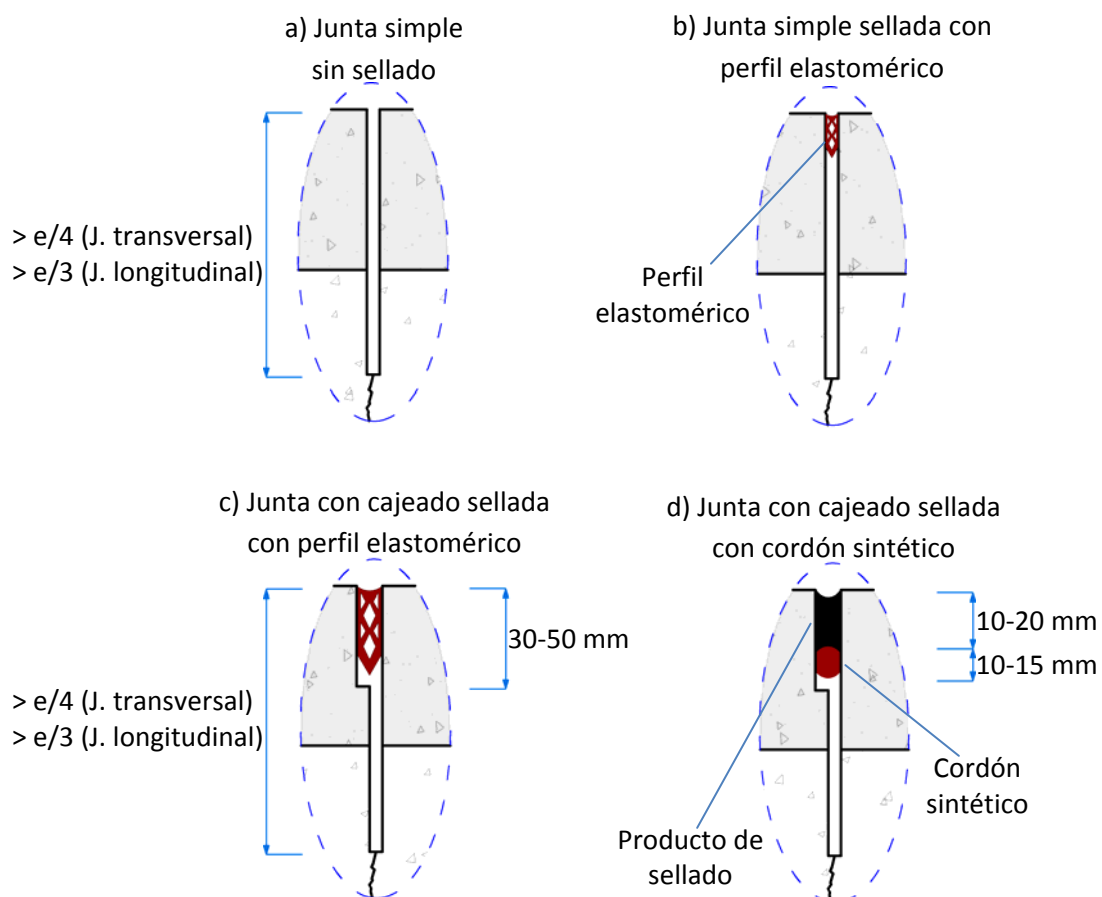


Figura 2.3.- Detalle de las juntas

El primer tipo de juntas (figura 2.3.a) se realiza con una sierra de lámina única y se emplea cuando no es necesario sellado o cuando éste se realiza con cordón elastomérico insertado bajo presión (figura 2.3.b). En cambio, el formato con cajado se produce con sierras dobles o mediante dos cortes sucesivos. Éstos se emplean en juntas donde se requiere espacio para un sellado con perfil elastomérico (figura 2.3.c) o con un cordón sintético sobre el cual se deposita un material de sellado (figura 2.3.d). La profundidad de la junta debe ser mayor que  $1/4$  del espesor ( $e/4$ ) mientras que su anchura debe ser inferior a 4 mm en la zona más profunda y 8 mm en la zona de cajado.

La función principal del sellado de juntas es minimizar la infiltración del agua superficial y de materiales incompresibles al interior de la junta del pavimento. Los materiales contaminantes incompresibles causan presiones de apoyo puntuales, que pueden promover desportillamientos y desprendimientos. El sellado también sirve para reducir la susceptibilidad al efecto conocido como “bombeo” (pumping) que se caracteriza por succión de agua de la lluvia a través de las juntas. El agua expulsada arrastra partículas más finas de la explanada, generando una progresiva pérdida de apoyo del pavimento.

Dada la relevancia del tema, la definición del sellado empleado y, por consiguiente, del tipo de junta se hace en base a la intensidad pluviométrica de la zona en que se encuentra la carretera, definida en la figura 2.4.

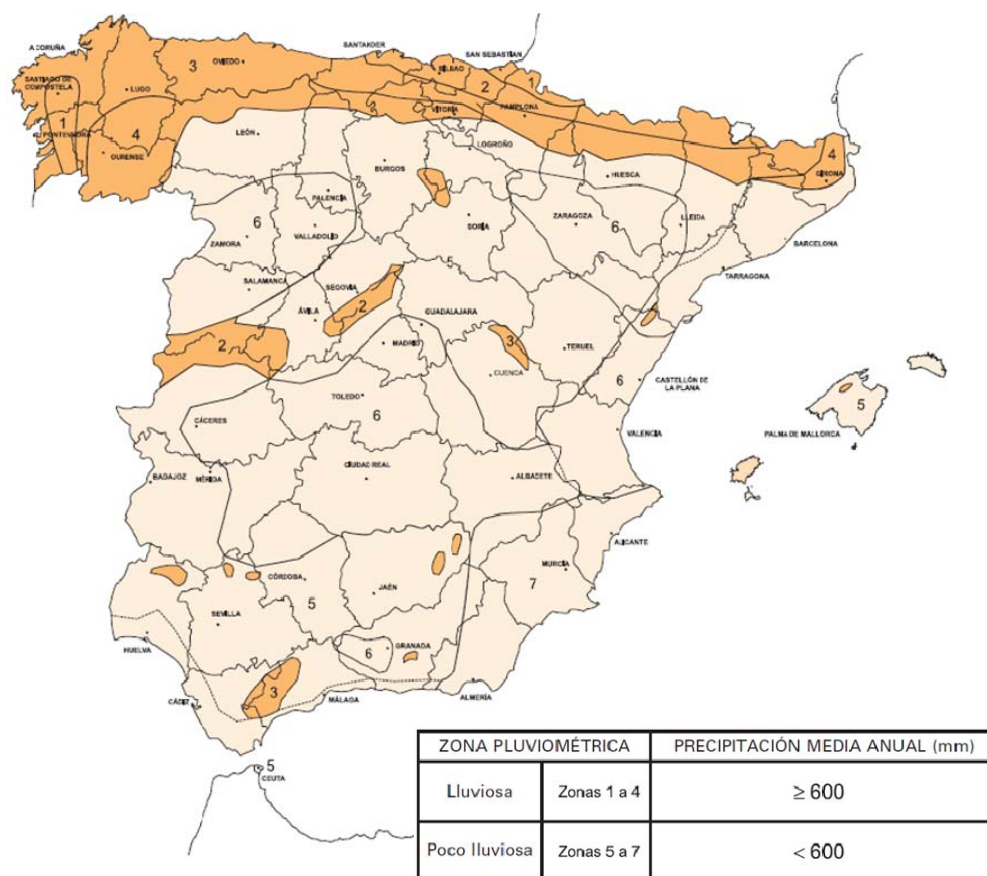


Figura 2.4.- Mapa de las diferentes zonas pluviométricas en España

En zonas pluviométricas lluviosas (zonas 1 a 4) se deben emplear juntas selladas de tipo simple o con cajeado de acuerdo con la configuración mostrada en las figuras 2.3.b, 2.3.c o 2.3.d. Por otra parte, en zona pluviométrica poco lluviosa (zonas 5 a 7) se permite dejar la junta sin sellar, con lo que también es posible emplear la configuración mostrada en la figura 2.3.a. No obstante, la instrucción austríaca obliga necesariamente a sellar las juntas, además de preconizar la capa asfáltica inferior de sellado.

En todo caso, el sellado de las juntas deben ser capaces de resistir las repeticiones cíclicas de contracción y expansión del pavimento. Todo material de sellado de juntas de pavimento de hormigón debe cumplir con los requerimientos de impermeabilidad, deformabilidad, resiliencia, adherencia, resistencia, estabilidad y durabilidad especificados en proyecto. Para asegurar la compresión y la estanqueidad, se recomienda usar perfiles elastoméricos de, al menos, 5 celdas con una anchura igual al doble de la anchura de la junta. En contraste, los cordones sintéticos deben presentar una anchura un 25% mayor que la anchura de la junta.

#### **2.6.1.b.- Juntas transversales de construcción**

Las juntas transversales de construcción se colocan al final del período de pavimentación o debido a cualquier interrupción superior a 30 minutos de los trabajos de hormigonado. Las mismas se ejecutan siempre con pasadores, que favorecen la trabazón y la transferencia de carga en la losa. El sellado y la forma de las juntas transversales de construcción se definen en proyecto de acuerdo con la zona pluviométrica, de manera idéntica a lo descrito con anterioridad para las juntas transversales de contracción.

De cara a reducir la incidencia de juntas en el pavimento, se recomienda que las interrupciones de hormigonado coincidan con las juntas longitudinales de contracción y de dilatación.

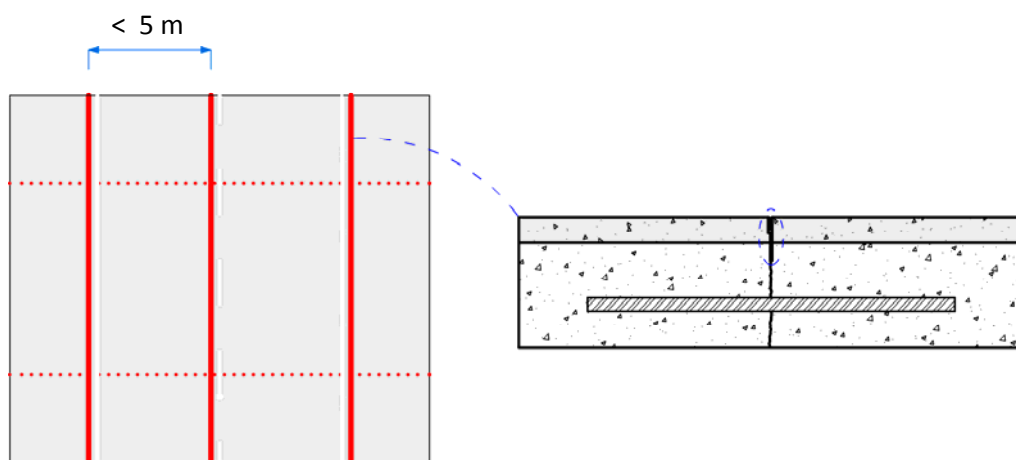
#### **2.6.1.c.- Juntas longitudinales de contracción**

Las juntas longitudinales de origen térmico (dilatación o contracción) evitan la formación de fisuras longitudinales que normalmente se desarrollan por los efectos combinados de las cargas y las restricciones del alabeo de la losa cuando el pavimento recibe el tráfico así como por el proceso de fraguado del hormigón. Estas juntas se emplean cuando la anchura de hormigonado es superior a 5 m, incluyendo dos ó más carriles.

Es recomendable dividir el pavimento en franjas aproximadamente iguales por cuestiones de uniformidad en el comportamiento estructural y en los esfuerzos de losas adyacentes. La posición de las juntas debe, siempre que sea posible, estar cerca a las separaciones entre carriles evitándose zonas que presenta una marca vial o pasadores. Ello responde, por un lado, a que se trata de alejar, en cierta medida, las cargas de tráfico y,

en particular, las de vehículos pesados, del borde de losa (y de esquina en las juntas) que son las más críticas en relación con el comportamiento (mayores tensiones) y, por otro lado, para no pintar en la zona de junta, ya que cuando se borra la pintura para una posible modificación (cosa más frecuente de lo que parece en el ámbito de carreteras) se puede dañar el material de sellado.

Las juntas longitudinales de contracción son formadas por entalle con profundidad mínima igual a  $1/3$  del espesor total del pavimento y ancho inferior a 4 mm en la zona más profunda e inferior a 8 mm en la zona del cajeado, si éste se ejecuta. Para mantener la trabazón del agregado y la transmisión de cargas entre losas se emplean barras de atado corrugadas tal y como muestra la figura 2.5.



*Figura 2.5.- Junta longitudinal de contracción*

En carreteras en que el pavimento está lateralmente restringido mediante un relleno por detrás de las guarniciones, no hay necesidad de usar barras de atado en las juntas más próximas al borde. Sin embargo, en carreteras que no tengan restricciones de movimiento lateral, las barras de atado se colocan para evitar que se abra la junta debido a la contracción de las losas de hormigón.

Las juntas longitudinales pueden ser de tipo simple o con cajeado y deben sellarse con perfil elastomérico insertado bajo presión (figura 2.3.b o 2.3.c) o con un sistema doble compuesto por un cordón sintético y producto de relleno (figura 2.3.d).

#### **2.6.1.d.- Juntas longitudinales de construcción**

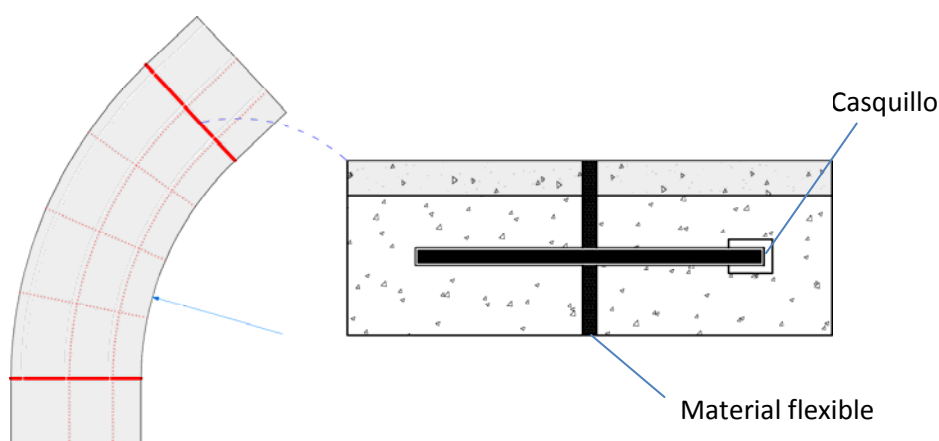
La junta longitudinal de construcción se usa en la unión de carriles adyacentes, guarniciones y cunetas. La norma 6.1-IC recomienda el proyecto de juntas longitudinales de construcción siempre que el hormigonado se realice por franjas. En la medida de lo posible, estas juntas deben coincidir con las separaciones entre carriles de circulación, evitando las zonas de rodadura del tráfico o con una marca vial. Las características de las juntas longitudinales de construcción en cuanto a la colocación de barras de atado, el corte y el sellado son idénticas a las presentadas para las juntas longitudinales de contracción.

### 2.6.1.e.- Juntas de expansión

Las juntas de expansión tienen la finalidad de permitir el movimiento vertical u horizontal del pavimento sin causar concentraciones de tensión y daños a estructuras adyacentes o al propio pavimento. Dichas juntas incluyen las juntas a toda la profundidad y a todo el ancho cerca a los apoyos o estribos de puentes, intersecciones con otros pavimentos y juntas alrededor de estructuras en el interior del pavimento (pozos de visita, alcantarillas y estructuras del alumbrado público). Las juntas de expansión también se emplean en las siguientes situaciones: cuando el pavimento se construye a temperatura ambiente inferior a los 4 °C, cuando las juntas de contracción permiten la infiltración de materiales incompresibles, o cuando los materiales usados en el pavimento han presentado precedentes de características expansivas.

Asimismo la Norma 6.1-IC recomienda que en las curvas con radio inferior a 200 m se debe realizar un estudio especial sobre la disposición de juntas transversales de expansión, con el fin de limitar las posibles tensiones que pudieran producirse por el efecto de las temperaturas. A falta de dicho estudio, en la mayoría de los casos es suficiente la disposición de juntas de expansión al comienzo y al final de la curva, manteniendo la longitud de las losas adoptada para el conjunto de la obra (figura 2.6).

Las juntas de expansión en curvas con radio inferior a 200 m, en transiciones con puentes y pavimentos flexibles, en intersecciones en "T", asimétricas y en rampas pueden o no presentar pasadores. Estos últimos se emplean cuando es necesario transmitir esfuerzos verticales entre losas y deben presentar, en una de las extremidades, casquillos que permiten el movimiento horizontal sin dañar el pavimento colindante (figura 2.6). Por el contrario, las juntas usadas en pozos de visita, alcantarillas, estructuras del alumbrado y edificios no presentan pasadores ya que las mismas están posicionadas alrededor de objetos que no requieren transferencia de carga.



*Figura 2.6.- Junta transversal de expansión*

De acuerdo con recomendaciones de la FHWA, las juntas de expansión suelen rellenarse con material flexible, presentando anchura superior a los 19 mm y atravesando

todo el espesor del pavimento. Para reducir las tensiones que actúan en la losa también es usual realizar un ensanchamiento de aproximadamente 20% del borde, iniciando a una distancia entre 0,75 m y 1,5 m de la junta. El material de filtro en la junta se extiende completamente por todo el borde ensanchado de la losa.

### 2.6.2.- Disposición de conectores y tamaño de la losa

Los pasadores son barras lisas de acero instalados en las juntas transversales, que sirven para transmitir esfuerzos verticales u horizontales entre losas. Por otra parte, las barras de atado son barras corrugadas de acero que se disponen perpendiculares a las juntas longitudinales con el fin de compatibilizar el comportamiento de las losas en el sentido transversal al tráfico

Los pasadores y barras de atado se colocan habitualmente durante el proceso de extendido del hormigón, presentándose las características técnicas de las mismas en el apartado 4.6.1. Ambos tipos son de distintas longitudes y diámetros en función de la junta a la que están asociadas. En la tabla 2.6 se presentan las características principales de ambos tipos (pasadores y barras de atado) requeridas por las normativas española y austriaca. Hay que recordar que la profundidad indicada en la tabla tiene en cuenta el espesor total de la losa y se mide desde la superficie del pavimento.

	Característica	Pasadores (Barra lisa)	Barras de atado (Barra corrugada)
Normativa española	Diámetro	25 mm	12 mm
	Longitud	500 mm	800 mm
	Profundidad	1/2 del espesor de la losa	1/2 del espesor de la losa
	Disposición en planta	Cada 30 cm en la zona de rodada y respecto a los bordes de las juntas longitudinales. En el resto, cada 60 cm aproximadamente.	Colocados con 1 metro de separación
Normativa austriaca	Diámetro	25 mm	14 mm
	Longitud	500 mm	700 mm
	Profundidad	1/2 del espesor total de la losa	2/3 del espesor total de la losa
	Disposición en planta	Cada 25 cm en la zona de rodada y respecto a los bordes de las juntas longitudinales. En el resto, cada 50 cm aproximadamente.	3 por losa, una de ellas en el centro y las otras dos separadas 1,5 m como máximo

Tabla 2.6.- Característica de los pasadores y barras de atado

Si bien ambas normativas coinciden en cuanto al diámetro, la longitud y la profundidad de los pasadores, la norma austriaca es más estricta con respecto a la

disposición en planta de los mismos. Las diferencias entre normativas son un poco mayores para el caso de las barras de atado. A este respecto, dado que las diferencias no son excesivamente significativas, la normativa de referencia debería ser la normativa española.

En la figura 2.7 se muestra la disposición de juntas transversales y longitudinales, así como la disposición de las barras de atado y de los pasadores, correspondientes al tramo experimental realizado en la C-17. En este caso se ha seguido el planteamiento de la normativa austriaca fruto de que la experiencia previa de los técnicos y equipos de la empresa constructora eran expertos en esta técnica. En total, se colocan 26 pasadores por junta transversal con un espaciado de 25 cm en la zona de rodada de los vehículos y 50 cm, en el resto. En cada losa se colocan 3 barras por junta longitudinal, separadas por una distancia de 1,50 m.

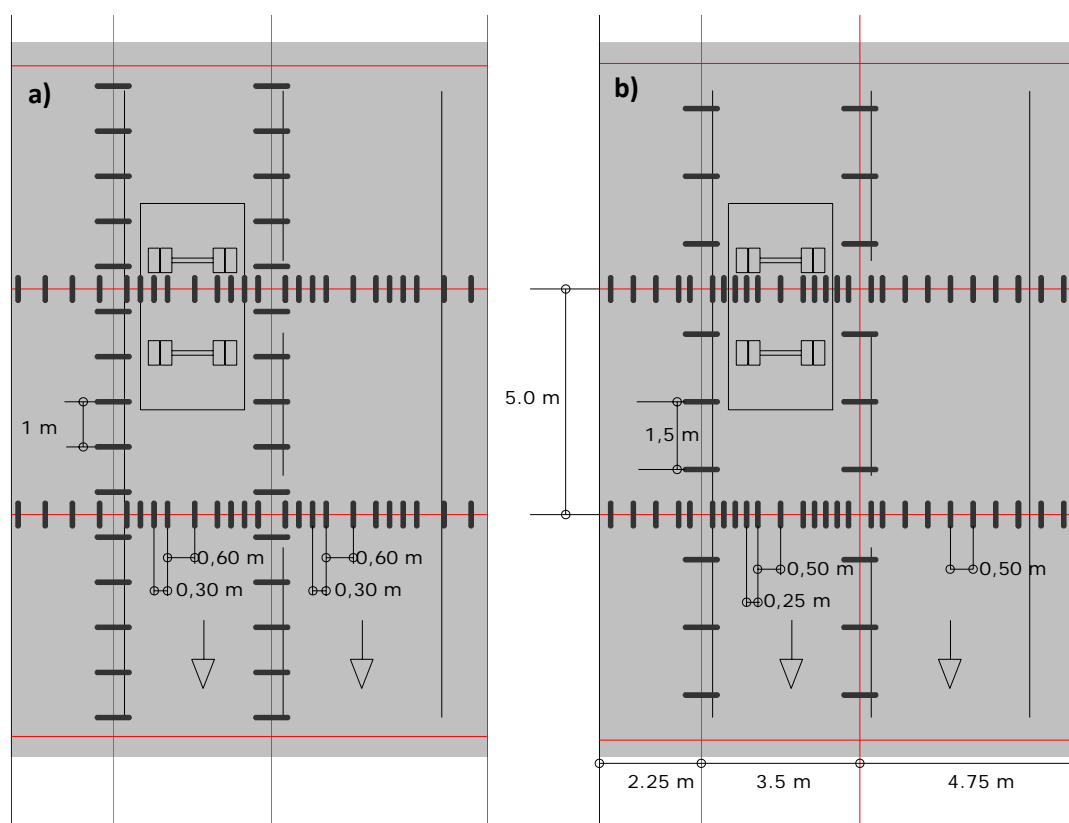


Figura 2.7.- Diagrama de distribución de juntas, pasadores y barras de atado (en m) según:  
a) norma española y b) norma austriaca

Como puede apreciarse en la figura 2.7, las juntas longitudinales se hacen coincidir, en cierta medida (existe un desplazamiento de 25 cm), con los carriles de tráfico. Ello da lugar a tres losas de ancho diferente. La losa correspondiente al arcén tiene 2,25 m de ancho, lo que da un ratio largo/ancho igual a 2,22 en las condiciones peores de exposición (a cielo abierto). Este ratio es algo superior al valor de referencia igual a 2, recomendado en la normativa española, pero está refrendado por la instrucción austriaca.



Esa recomendación pretende evitar que la losa tenga un comportamiento estructural no uniforme, presentando fenómenos de retracción y esfuerzos distribuidos en una dirección preferente, lo que puede dar lugar a fisuras en el pavimento. No obstante, en el caso del tramo experimental realizado en la C-17, se optó por atenuar el ratio establecido de cara a situar la junta longitudinal fuera de la zona de carriles, la cual recibe mayor intensidad de tráfico que el arcén.

## 2.7.- TRANSICIÓN Y CONEXIÓN CON OTROS SISTEMAS

Aunque frecuentemente el proyecto de pavimentos de hormigón se considera, principalmente desde un punto de vista estricto, al análisis de espesores y juntas. Existen otros detalles que merecen atención en la fase de proyecto dada su relevancia para el buen desempeño del pavimento. Este es el caso de la transición de los pavimentos bicapa con puentes y pavimentos flexibles, la conexión con el arcén y la definición del sistema de drenaje, Los cuales se describen en detalle a continuación.

### 2.7.1.- Transiciones con pavimentos flexibles

Las incompatibilidades en el comportamiento estructural en transiciones entre pavimentos rígidos y flexibles plantean dos problemas principales. Por un lado, la expansión de los pavimentos bicapa puede producir una sobreelevación del pavimento flexible, causando un desnivel en la carretera. Por otro lado, los pavimentos flexibles y su base pueden presentar deformaciones plásticas frente a cargas cíclicas, lo que da lugar a resaltos localizados con respecto al pavimento rígido.

A fin de reducir la incidencia de esos problemas se suelen usar sistemas de transición formados por juntas de expansión y losas intermedias de hormigón armado asentada sobre una capa de hormigón de limpieza, como muestra la figura 2.8.

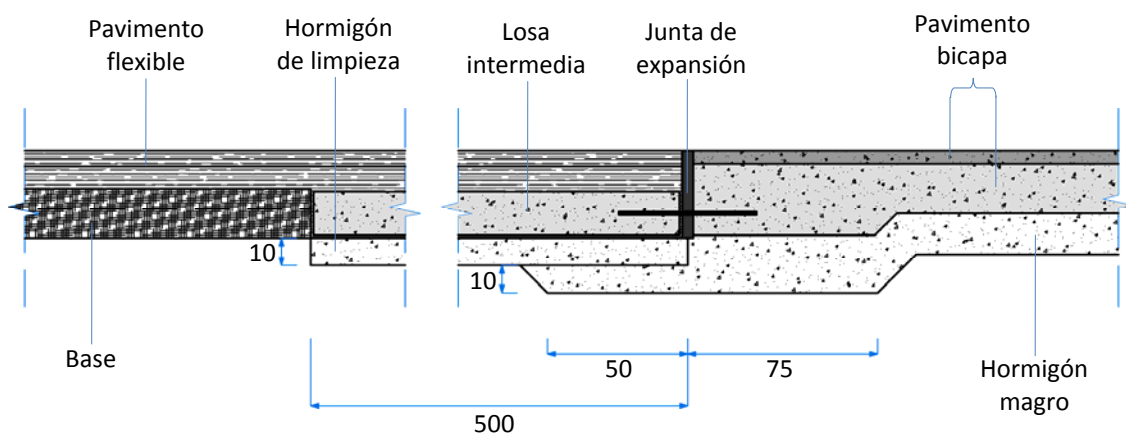


Figura 2.8.- Transición de un pavimento bicapa de hormigón a un pavimento flexible

En ese sistema, las juntas de expansión reducen los esfuerzos debido a la variación dimensional del pavimento, mientras que la losa intermedia da un soporte adicional al pavimento flexible en la zona de transición. De cara a evitar deformaciones diferenciales excesivas del pavimento flexible, se recomienda extender, aparte de longitud la losa de transición, la base de hormigón magro del firme rígido. Asimismo se debe tener un cuidado especial con la compactación de la base y la sub-base del firme flexible. En la figura 2.9 se observa el detalle del ensanchamiento del borde del pavimento bicapa producido con el objetivo de reducir el nivel de tensiones transmitidas.

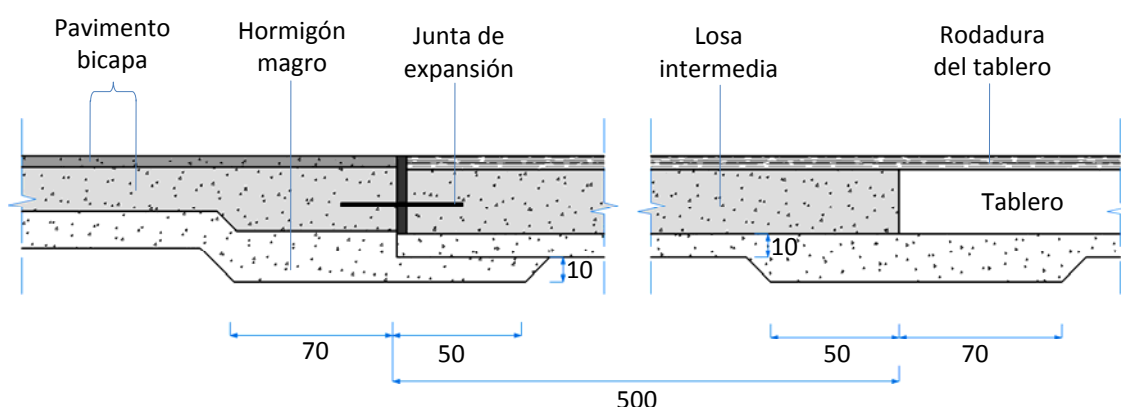


Figura 2.9.- Transición de un pavimento bicapa y un puente (losa intermedia sobrepuesta)

### 2.7.2.- Transiciones con puentes

Las transiciones entre los pavimentos bicapa y los puentes se diseñan para evitar la transmisión de esfuerzos de compresión no contemplados en proyecto y evitar la aparición de resaltos diferenciales. Aunque existen diversas configuraciones de transición posibles, generalmente se emplean juntas de expansión y losas de transición intermedias de hormigón armado asentadas sobre una capa de hormigón de limpieza. La junta de expansión (apartado 2.6.1.e) tiene la función de absorber las variaciones dimensionales del pavimento y de la losa intermedia. Esta última sirve para compatibilizar el cambio de rigidez que supone pasar del pavimento (más flexible) al puente (más rígido), evitando así la formación de asientos diferenciales y de resaltos.

La figura 2.10 muestra las dos posibles configuraciones de la losa intermedia. En la primera de ellas, la losa se coloca sobre la estructura del puente haciendo tope con el tablero, mientras que en la segunda, la losa se instala fuera del puente, contigua al murete de estribo o conectado a éste.

La instrucción austríaca recomienda que, en puentes con longitud mayor que 200 m, se deben construir una segunda junta de expansión entre la losa intermedia de hormigón armado y el puente. Según la misma instrucción, es obligatorio el sellado de las juntas ubicadas a una distancia de 150 m del puente.

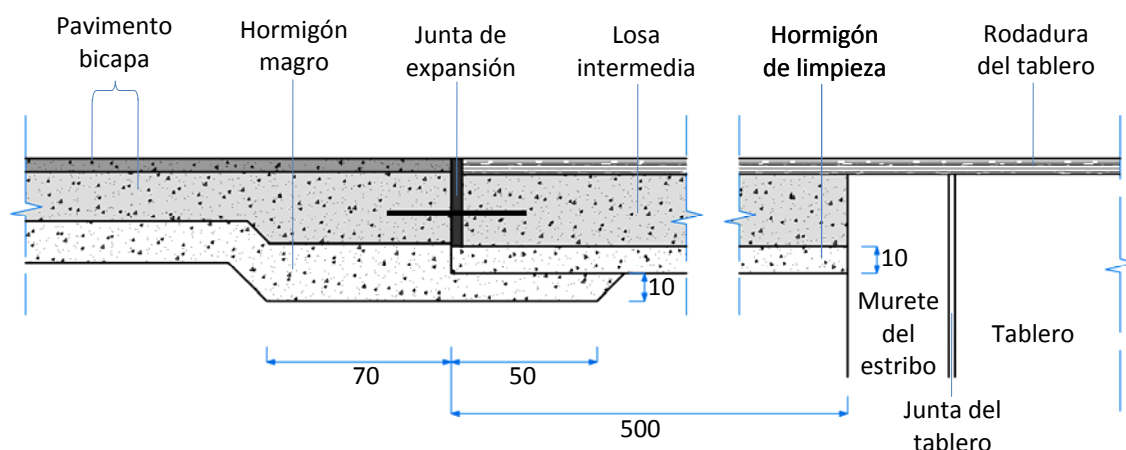


Figura 2.10.- Transición de un pavimento bicapa y un puente (losa intermedia contigua)

### 2.7.3.- Conexión con el arcén

La conexión de los pavimentos bicapa de hormigón con el arcén generalmente sigue las mismas recomendaciones usadas en pavimentos flexibles. Entre las diferentes opciones contempladas, existe la posibilidad de emplear el mismo material que en las calzadas, lo que da lugar a un arcén de hormigón, o usar un conjunto de materiales de relleno con un revestimiento superficial en material bituminoso. Si bien no suele ser la alternativa económicamente más atractiva, el uso de arcenes de hormigón representa un aporte a la capacidad estructural del pavimento, que puede ser significativa en la categoría de tráfico.

Para las categorías de tráfico T00 y T0, el arcén debe estar conformado por un pavimento de hormigón en masa con características idénticas a las empleadas en la calzada y espesor mínimo de 15 cm (figura 2.11.a). No obstante, por una cuestión de compatibilidad de comportamiento estructural, la anchura total del firme usado en el arcén coincidirá con la usada en la calzada. Para ello, se permite emplear un relleno de zahorra artificial drenante o un suelo cemento entre el pavimento y la explanada. Asimismo se disponen juntas longitudinales entre el pavimento del arcén y de la calzada, de acuerdo con las recomendaciones presentes en el apartado 2.5 de este manual.

Para la categoría de tráfico T1, el pavimento del arcén puede estar conformado en hormigón en masa (con las características descritas en el párrafo anterior) o con mezcla bituminosa en caliente (figuras 2.11.c y 2.11.d). En ese último caso, se emplean dos capas: con 15 cm de espesor total y un relleno de zahorra artificial drenante hasta la explanada, o bien con 10 cm de espesor total y un relleno de suelo-cemento (prefisurado a cada 4 m). Otra opción es pavimentar el arcén con hormigón magro vibrado de espesor igual al del pavimento de la calzada, con juntas transversales de contracción con barras de atado y un relleno de zahorra artificial o suelo cemento (figura 2.11.b).

Para las categorías de tráfico T2 y T31, se emplea una capa de rodadura de mezcla bituminosa en caliente muy flexible de 5 cm de espesor. Bajo esta se dispone una capa prefisurada a cada 4 metros de suelo-cemento o suelo de tipo S-EST3 (con resistencia a compresión simple a 7 días no inferior a 2,5 MPa). En ambos casos se respeta un espesor mínimo de 20 cm y un espesor máximo de 25 cm y 30 cm para grava-cemento y suelo-cemento, respectivamente. El relleno entre esa capa y la explanada se hace con zahorra artificial drenante tal y como puede apreciarse en la figura 2.11.e.

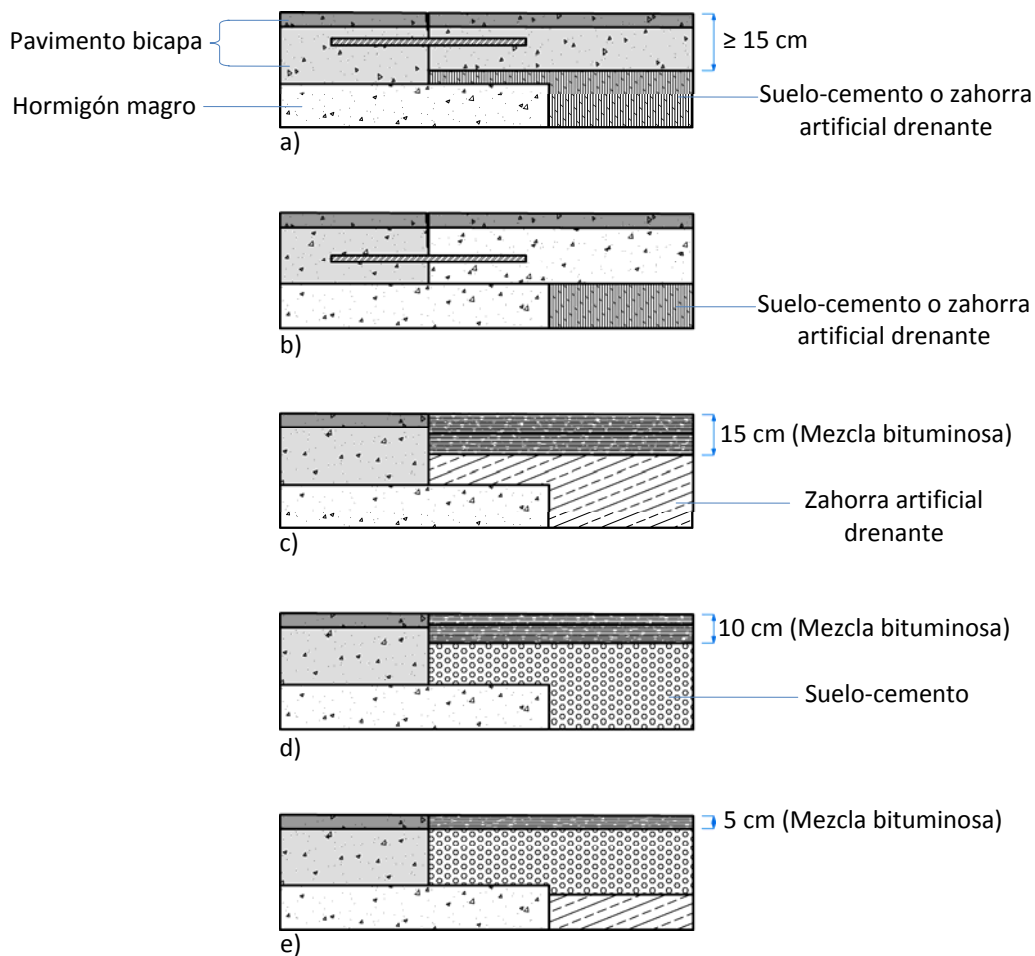
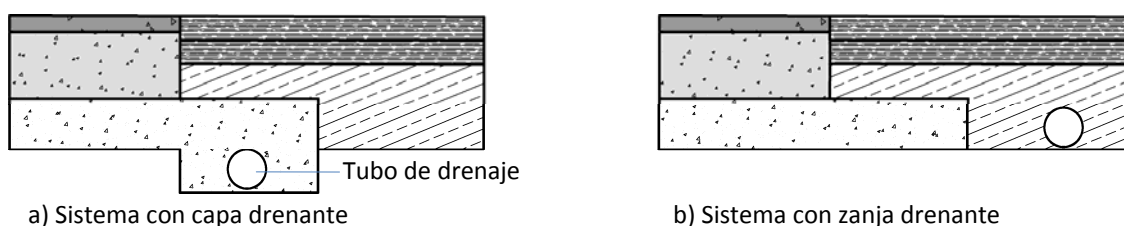


Figura 2.11.- Tipos de arcenes

Dadas las bajas solicitaciones, los arcenes empleados en carreteras con categoría de tráfico T32 y T4 se construye sin pavimento o con un riego de gravilla. Independientemente de la categoría de tráfico, por cuestiones de seguridad es menester que las vías de servicio no agrícolas de autopistas y autovías presenten una capa de rodadura con la misma rasante que la calzada.

### 2.7.4.- Sistema de drenaje

La infiltración de agua es uno de los principales factores capaces de causar pérdida de soporte y escalonamiento de las losas, comprometiendo así el desempeño y la durabilidad de los pavimentos rígidos. Por lo tanto, una vez el agua haya infiltrado, es fundamental promover su drenaje rápido del pavimento. Ese drenaje se produce en los firmes rígidos mediante los sistemas con capa drenante o con zanja drenante, como se muestra en la figura 2.12.



*Figura 2.12.- Tipos de arcenes*

En el primer sistema (figura 2.12.a), se dispone bajo el pavimento una capa drenante que puede ser tanto de geotextil grueso compatible con las exigencias estructurales del firme, como de material tratado o no tratado. La capa presenta un ensanchamiento en las extremidades del pavimento donde se instalan los tubos de drenaje. Ese sistema tiene la ventaja de evitar la acumulación de agua entre capas poco permeables del pavimento, sin embargo, requiere gastos más elevados y una etapa adicional a la hora de construir el firme.

En el segundo sistema (figura 2.12.b) se produce una zona drenante a lo largo del borde exterior del pavimento, la cual acomoda los tubos de drenaje. Si bien suele ser menos eficiente que el primero, ese sistema es más económico y sencillo de ejecutar.

### 2.7.5.- Marcas de señalización horizontal

Las marcas de señalización horizontal generalmente se producen mediante la aplicación de tintas o resinas a la superficie los pavimentos y pueden ser de carácter temporal, cuando sirve de elemento auxiliar al proceso de construcción, o permanente, cuando sirve de orientación a los usuarios de la carretera. Especialmente en el último caso, las marcas de señalización horizontal deben atender a requisitos con respecto a coeficiente de luminancia difusa, factor de luminancia y coeficiente de luminancia retrorreflejada. Los requerimientos correspondientes a cada uno de estos parámetros y las diferentes clases de exigencia definidos en la norma BS EN 1436:2007 se muestran en la tabla 2.7.

Tipo	Coeficiente de luminancia difusa		Factor de luminancia		Coeficiente de luminancia retrorreflejada	
	Clase	Requerimiento mínimo ( $\text{mcd.m}^2.\text{lx}^{-1}$ )	Clase	Requerimiento mínimo (-)	Clase	Requerimiento mínimo ( $\text{mcd.m}^2.\text{lx}^{-1}$ )
Blanca	R0 <sup>1</sup>	-	B0 <sup>1</sup>	-	Q0 <sup>1</sup>	-
	R2	$\geq 100$	B3	$\geq 0,4$	Q3	$\geq 130$
	R4	$\geq 200$	B4	$\geq 0,5$	Q4	$\geq 160$
	R5	$\geq 300$	B5	$\geq 0,6$		
Amarilla	R0 <sup>1</sup>	-	B0 <sup>1</sup>	-	Q0 <sup>1</sup>	-
	R1	$\geq 80$	B1	$\geq 0,2$	Q1	$\geq 80$
	R3	$\geq 150$	B2	$\geq 0,3$	Q2	$\geq 100$
	R4	$\geq 200$	B3	$\geq 0,4$		

Nota 1: En esa clase no hay especificación de requerimientos mínimos.

*Tabla 2.7.- Requerimientos mínimos de coeficiente de luminancia difusa, factor de luminancia y coeficiente de luminancia retro-reflejada*

Cabe matizar que, en los pavimentos de hormigón, las marcas de señalización horizontal de color blanco suelen ser aplicadas sobre una pintura de base en color negro de modo a aumentar el contraste con la capa de rodadura.

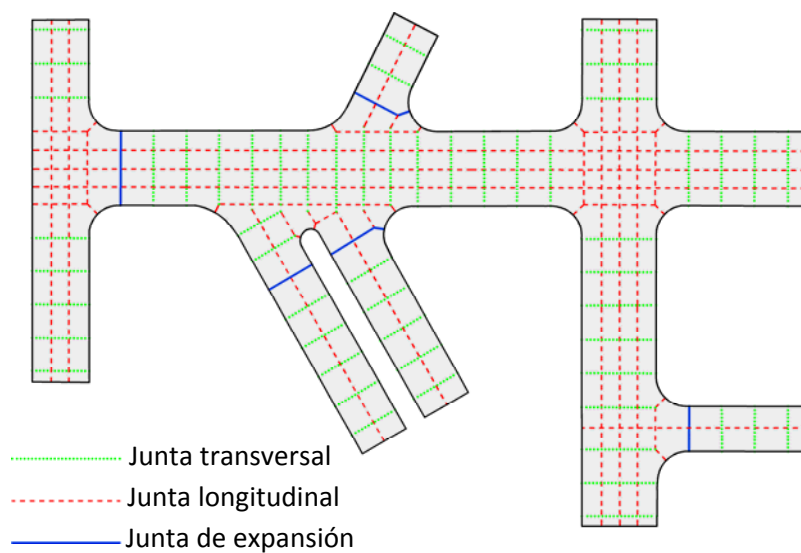
#### 2.7.6.- Intersección de vías, carriles de cambio de velocidad y cuñas de transición

En las construcciones de carretera usualmente se diseñan encuentros entre vías principales y secundarias, lo que da lugar a las intersecciones en “T”, en cruz y asimétricas. Eso supone una compatibilización entre el sistema de juntas existente en cada una de las vías, tal y como puede apreciarse en la figura 2.13.

Las juntas de dilatación se concentran principalmente en las intersecciones en “T” y asimétrica de vías principales y secundarias. En las áreas de encuentros, habiendo la superposición de juntas longitudinales y juntas transversales, se da preferencia a la primera.

En las intersecciones también deben disponerse de carriles de cambio de velocidad, cuñas de transición y tramos de transición para facilitar los movimientos de entrada y salida de los vehículos. De acuerdo con la O.M. de 16 de diciembre de 1997, los accesos a vías deberán construirse con el mismo firme de la autovía y presentar una visibilidad en la carretera superior a la distancia de parada para el carril y sentido de la

circulación de la margen en que se sitúa. Los tipos y dimensiones de los carriles de cambio de velocidad, las cuñas de transición y el tramo de transición hasta la vía de servicio deben seguir lo que dispone el Capítulo II, Sección I, del Título III de la O.M. de 16 de diciembre de 1997.



*Figura 2.13. Distribución de las juntas en las intersecciones de vías*

## CAPÍTULO 3

### EJECUCIÓN

#### 3.1.- INTRODUCCIÓN

En el capítulo anterior se ha comentado todo lo referente a la concepción, planteamiento, características, y aspectos específicos del proyecto de los pavimentos bicapa de hormigón. Una vez conocidos estos puntos hay que tener presente las condiciones particulares de la puesta en obra de este tipo de pavimentos.

El presente apartado tiene como objetivo presentar, de una manera sistematizada, las características principales de la ejecución de estos pavimentos en lo que hace referencia a la fabricación de los materiales, transporte y puesta en obra, así como las diferentes tareas de terminación.

Dentro del capítulo, en primer lugar se hace una presentación de los equipos mecánicos y humanos necesarios para la ejecución de una obra de pavimentos bicapa de hormigón; mientras que en la segunda parte del capítulo se hace la presentación de los pasos a seguir y características de ejecución de estos pavimentos bicapa. Dada la singularidad de los mismos, se hace énfasis en su explicación, por lo que en este caso se sigue la experiencia austriaca, teniendo presente que no es contrapuesta a la experiencia española de pavimentos monocapa, justificándose las razones de las diferencias.



### 3.2.- EQUIPOS MECÁNICOS NECESARIOS

En este apartado se detalla la maquinaria y los equipos específicos necesarios para la ejecución de los pavimentos bicapa de hormigón, con dimensiones variables de la anchura de la calzada, pudiéndose llegar hasta 14,00 m. Esta descripción se acompaña de diferentes comentarios a tener en cuenta, para cada equipo, a fin de garantizar, en la medida de lo posible, la eficiencia óptima de cada uno de ellos en el proceso de ejecución.

La tipología de los equipos se presenta según su función y orden de ejecución del proceso constructivo, esto es, según la fabricación y transporte del hormigón, la extensión de los hormigones (construcción del pavimento) y tareas complementarias al mismo (incorporación de los pasadores, precurado, etc.) incorporadas en el mismo tipo de maquinaria, y la terminación y ejecución de juntas.

Como se verá a lo largo de este capítulo, esta tecnología requiere que los procesos estén muy bien planteados y se tenga respuestas previstas para cualquier incidencia, para reducir de forma significativa los riesgos de parada, en aras a evitar problemas en la unión de las capas o irregularidades, así como otros tipos de incidencias.

#### 3.2.1.- Fabricación y transporte del hormigón

Para la correcta ejecución de este tipo de pavimento que asegure una correcta regularidad superficial, es de vital importancia garantizar un flujo constante de unos hormigones homogéneos, esto es, avalado el nivel de prestaciones requerido de los materiales, es imprescindible garantizar también unos procesos de fabricación óptimos, así como la logística de los mismos.

En este línea es importante que no haya cortes de suministro durante la ejecución, es muy importante contar con acopios suficientes de los diferentes componentes de los hormigones así como poder asegurar un volumen de material de construcción de, como mínimo, el necesario para un día de ejecución completo.

La fabricación del hormigón de ambas capas ha de realizarse en plantas dotadas de amasadoras. Dado que en este tipo de pavimento con hormigón bicapa, el rendimiento de puesta en obra viene impuesto por el método continuo de ejecución y es necesaria una absoluta garantía de calidad, es conveniente disponer de, al menos, una central de capacidad y tolvas suficiente que pueda trabajar holgadamente durante la construcción (aunque lógicamente esto dependerá de la envergadura de la obra en sí). En el caso de una sola central de capacidad suficiente para suministrar los dos hormigones, requiere unas condiciones de procesos exigentes, tanto para el orden de suministro como para el mantenimiento de la limpieza de la amasadora de una dosificación a la otra, en consecuencia, se recomienda el empleo de dos amasadoras, con dos juegos de tolvas independientes.

Dado que la cuantía proporcional necesaria para el hormigón de la base es del orden de 4 veces mayor de la del hormigón de la capa de rodadura (aunque esto dependerá de los parámetros de diseño), el volumen y la producción de las amasadoras deberá atenerse a los criterios de productividad requeridos para cada hormigón.

El transporte de ambos hormigones debe realizarse con equipos que garanticen la eficiencia que necesita el sistema constructivo particular de este tipo de pavimentos. También, dada la consistencia seca de los hormigones, se recomienda el transporte con camiones volquete con una capacidad suficiente, por ejemplo, de al menos 12 m<sup>3</sup> en el caso del hormigón de base, pudiendo ser menor en el caso del hormigón de la capa de rodadura, cara a evitar un secado del hormigón en el proceso de espera hasta su extendido.

En el caso del hormigón de la capa de rodadura, dado que son menores cantidades y, que por otro lado, se debe verter a una cinta transportadora, puede recomendarse, asimismo, el transporte en camión volquete, si bien para el vertido se propone el empleo de una pala excavadora (figura 3.1a) como elemento intermedio entre el camión y la tolva receptora antes de la cinta (figura 3.1b). En casos extremos, se podría emplear camión cuba, siempre que la descarga no retrase la obra, teniendo en cuenta que este sistema de puesta en obra no debe modificar las prestaciones requeridas para el hormigón de la capa de rodadura. Para el uso de esta alternativa debe garantizarse la viabilidad de la misma sin afectar a las prestaciones del hormigón y ritmo del proceso.



*Figura 3.1.- Vertido del hormigón capa rodadura: a) Pala intermedia, b) tolva receptora*

En cualquier caso, la plantilla de unidades disponible debe ser suficiente para una alimentación continua a lo largo de la ejecución; lógicamente esto no sólo dependerá del volumen unitario de reparto como de la distancia del tramo de obra respecto a la planta o plantas de hormigonado. En casos particulares o momentos puntuales podría recurrirse al uso de otros equipos de menor versatilidad y rendimiento (por ejemplo camiones cuba convencionales) aunque no se aconseja recurrir a ellos de manera usual ya que bajarían los rendimientos de descarga. En todo caso, como regla general, el transporte debe realizarse tan pronto como sea posible y con el menor número de medios diferentes, con el

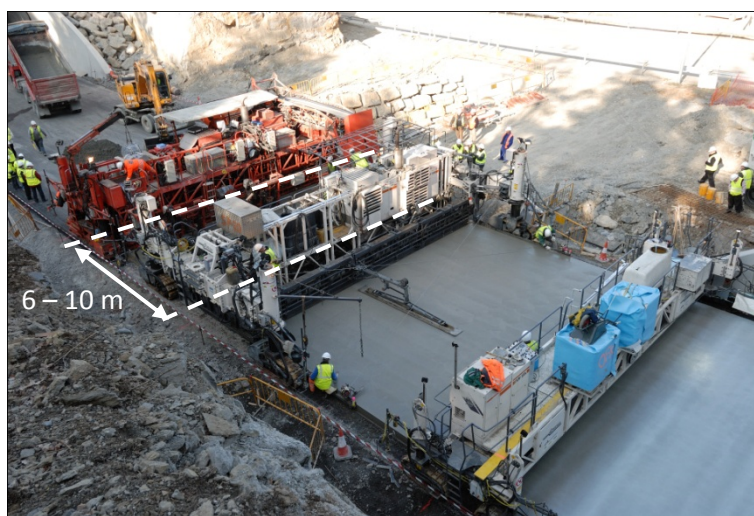
fin de evitar que se alteren las características del material (homogeneidad, consistencia, plazo de trabajabilidad, etc.).

Durante el transporte, y especialmente en tiempos de recorrido elevados, condiciones climatológicas adversas, etc., es necesario tapar la caja del volquete para proteger el hormigón contra la desecación que pueda producirse durante el transporte y que pueda repercutir negativamente sobre las características del hormigón, para lo cual pueden emplearse lonas o cobertores adecuados.

Las paradas por falta de suministro en la ejecución del pavimento deben evitarse al generar una discontinuidad no voluntaria en la construcción de la losa, que puede perjudicar la unión entre capas e irregularidades superficiales que empeoren la rodadura. Por ello debe limitarse la distancia entre las dos extendedoras (que depende de la velocidad de avance del tren de pavimentación, aunque puede fijarse un orden de magnitud entorno los 6 – 10 metros), y en el caso de que está aumente de forma significativa, debe pararse la primera extendidora y llegar incluso a retirar el hormigón ya colocado, creando una junta. En consecuencia deben tenerse previstas las respuestas y los medios ante los problemas técnicos que puedan surgir en la planta de fabricación, así como tener una buena coordinación en el transporte del material desde la/s planta/s al tajo, garantizando la alimentación constante durante la ejecución.

### 3.2.2.- Extensión

La extensión de los hormigones se realiza mediante dos pavimentadoras de encofrado deslizante (una para cada tipo de hormigón), adaptadas para su extensión simultánea y funcionamiento continuo, tal como puede verse en la figura 3.2, correspondiente a la experiencia del tramo Vic-Ripoll.



*Figura 3.2.- Vista general de la configuración de los distintos equipos*

Estas extendedoras deben garantizar tanto la precisión del espesor de extendido como el grado de compactación requerido gracias a los equipos de que van dotadas. La primera extendedora del hormigón de la capa de base de una potencia superior a los 270 kW (figura 3.3), deberá estar montada para el ancho de construcción del extendido pertinente, con los equipos de trabajo siguientes:



*Figura 3.3.- Parte anterior de la extendedora de la capa de base*

- Cuchilla o regla de reparto transversal que asegure una buena distribución del hormigón de la capa de base.
- Batería de vibradores que garantice la compactación del hormigón en todos los puntos de la losa. La cuantía unitaria de los equipos de vibración dependerá lógicamente de la potencia de los mismos (volumen de afectación) y de la cantidad de material a compactar (espesor de la losa). Para vibradores en codo de potencia estándar y para espesores de la capa de base de unos 20 cm pueden disponerse unas dos unidades por metro lineal de ancho de la losa.
- Molde de extendido (encofrado) del hormigón de la base.
- Insertador de pasadores de junta transversal.
- Insertadores de barras de atado de junta longitudinal, precisándose tantas unidades como juntas longitudinales de proyecten.
- Tolva y cinta de alimentación de la segunda extendedora.

La segunda extendedora del hormigón de la capa de rodadura, asimismo de una potencia superior a los 270 kW (figura 3.4), deberá estar montada también para el mismo ancho de extendido que la de la capa de base, con los siguientes equipos de trabajo:

- Cuchilla o regla de reparto transversal que asegure una buena distribución del hormigón de la capa de rodadura.



- Batería de vibradores que deben garantizar la compactación óptima del hormigón. Al ser el espesor de la capa de rodadura de 5 cm, los aparatos vibradores deberán ser de afectación más superficial (por ejemplo en T invertida) y su cuantía dependerá únicamente de la potencia de los mismos, siendo 1 - 2 unidades la cantidad unitaria típica para potencias normales.
- Molde de extendido (encofrado) del hormigón de rodadura.
- Regla alisadora transversal oscilante. Delante de ésta se va originando un rodillo de hormigón sobrante, muy útil para corregir posibles irregularidades o desperfectos superficiales del acabado.
- Fratasadora o superllana oscilante transversal que genere una textura superficial uniforme, eliminando la lechada superficial sobrante y corrigiendo las posibles huellas de los insertadores.
- Extensiones de encofrados laterales de losa con cables tensores.



*Figura 3.4.- Extendidora de la capa de rodadura*

El guiado de las extendedoras se realiza mediante palpadores apoyados sobre cables laterales sujetos por picas de soporte o estacas de nivelación. Estas estacas deben disponerse de modo que reduzcan la flecha del cableado (usualmente, 1 unidad cada 5 metros). En los extremos del cable (final de ejecución) se deben disponer cabrestantes de tensión anclados al terreno. Las tolerancias pueden establecerse de forma directa, limitando que la flecha en el centro del vano entre estacas sea menor a 20 mm, o bien indirectamente, a través de definir la entre la distancia entre estacas, antes señalada, con una tolerancias menores a  $\pm 0,25$  m.

### 3.2.3.- Acabados

Para el acabado de la capa de rodadura se precisan de los siguientes equipos con diferentes funciones:

- Riego para el vertido del inhibidor de fraguado y líquido del primer curado. Estos equipos se recomienda estén montados en una plataforma móvil, con una potencia superior a los 40 kW y del mismo ancho que las extendedoras, tal como puede verse en la figura 3.5. El guiado de este equipo se lleva a cabo a través del mismo cableado que hace de guía a las extendedoras.



Figura 3.5.- Parte posterior del tren de pavimentación correspondiente al carro de curado

- Barrido para la creación de la textura superficial. Dado que se requiere un barrido energético y de gran superficie en condiciones usuales, se recomienda el empleo de una motoniveladora adaptada mediante la instalación de un cepillo en el círculo de la cuchilla y otro en la parte frontal, tal como puede verse en la figura 3.6.
- Eliminación de finos. Como puede verse en la figura 3.6, el barrido levanta polvo que hay que retirar, recomendándose realizarlo con una minihoja de un eje autopropulsada, tal como se muestra en la figura 3.7.



Figura 3.6.- Barredora montada sobre una motoniveladora adaptada



Figura 3.7.- Eliminación de finos con el empleo de una minihoja autopropulsada

- Segundo curado. El curado definitivo (o segundo curado) puede realizarse con equipos adaptados (por ejemplo un mini tractor agrícola con lanza de riego

desplegable), manualmente, o con algún sistema deslizante de lonas de plástico adaptado al ancho de la losa.



*Figura 3.8.- Equipo tipo para el segundo curado*

### 3.2.4.- Juntas

La construcción de las juntas se lleva a cabo mediante equipos de serrado con máquinas autopropulsadas, con una potencia superior a 60 kW. Para las juntas transversales (figura 3.9a), se precisa un equipo de corte con disco de diamante de 4 mm, aspirador captador de polvo por vía húmeda y desplazamiento del disco a máquina parada para el comienzo y terminación de corte en bordes. En las juntas longitudinales (figura 3.9b) se precisa de dos discos sucesivos de 4 mm según el ancho para la realización de cortes simultáneos a dos profundidades y dos espesores diferentes, y aspirador captador de polvo por vía húmeda. El guiado de las cortadoras es, en ambos casos, mediante guiado laser.



*Figura 3.9.- Cortadoras de juntas: a) transversales y b) longitudinales*

Para finalizar las juntas se requiere de un equipo manual con objeto de hacer el biselado de las mismas y, con posterioridad, otros equipos, para el sellado de las mismas. En la figura 3.10a se muestra el equipo empleado en la experiencia de Vic-Ripoll para el



cajeado, mientras que en la figura 3.10b se presenta el equipo de sellado de juntas mediante perfiles elastoméricos.



*Figura 3.10.- Equipos finalización de juntas: a) Cajado y b) Introducción perfiles elastoméricos*

### 3.3.- EQUIPO HUMANO

Antes de nada, hay que enfatizar la importancia que tiene la experiencia y conocimiento previo del equipo humano, el cual debe estar entrenado y tener criterio de actuación inmediata ante cualquier incidencia que se pueda presentar durante el hormigonado continuo, especialmente los que van en la extendedora.

La dimensión del equipo humano no depende tanto de la envergadura de la obra como de la maquinaria a emplear, la cual viene bastante fijada en el método constructivo propuesto en el presente manual.

El equipo necesario, basado en las experiencias austriacas, es de unas 20 personas tal como puede verse en la tabla 3.1. El número responde a que las operaciones se pueden producir simultáneamente, por lo que no se compaginan actividades, si bien la distribución de tareas no es totalmente homogénea. En dicha tabla se detallan las funciones de cada área, el personal requerido con el perfil del mismo, así como las responsabilidades, según la distribución base siguiente: cuerpo de mando, instalación del cable de nivelación, tareas de extendido del hormigón, tareas de terminación y tareas de corte de las juntas.

En ésta tabla no se consideran las tareas de fabricación y transporte de los hormigones, laboratorio y control, ni el personal requerido para ello, ya que se entiende en cierta medida como un suministro externo, no específico del sistema constructivo.



Función	Equipo	Responsabilidad	Ref.
Cuerpo de mando	1	Jefe o coordinador general	JG
	1	Jefe de máquinas	JM
	1	Jefe de personal	JP
Instalaciones previas	2	Operarios para la instalación del cable de nivelación y guiado de los equipos extendedores: colocación de los soportes del cableado de nivelación y dirección. (La ubicación de los soportes debe ser realizada por un topógrafo)	CN
Extendido del hormigón	1	Operario de apoyo a la descarga de camiones delante de la primera extendedora	DC
	1	Operador de excavadora para el transporte secundario del hormigón de la capa de rodadura (transferencia del material desde el camión volquete a la tolva de alimentación de la segunda extendedora)	ET
	1	Operador de la 1ª extendedora	E1
	1	Operador de la 2ª extendedora	E2
	1	Operador del carro de curado	E3
	2	Operarios para el fratasado y refinado de los laterales de la 2ª extendedora	FR
	1	Operario sobre regla alisadora transversal oscilante	RA
	3	Operarios para revisión y recarga de pasadores y ayuda a otras tareas diversas	PS
Terminación (denudado, barrido, curado)	1	Operador de la barredora y cuba de 2º curado	BR
	1	Operador de cuchilla automotriz para la retirada del polvo de barrido	CA
Corte juntas	2	Operarios para la ejecución tanto del corte como del relleno de las juntas	JT

*Tabla 3.1.- Equipo humano necesario y funciones del mismo*

### 3.4.- ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN

En este apartado se listan las diferentes tareas específicas, por orden de ejecución, a efectuar en la construcción de los pavimentos bicapa de hormigón. Éstas son: la construcción de la capa de regulación pertinente al caso, el vertido, extendido y regularización de las capas, la aplicación del inhibidor de fraguado y 1º líquido de curado,

las tareas de barrido y 2º curado de la superficie del pavimento, la ejecución de las juntas, el sellado de las juntas y la ejecución de las juntas de fin de día.

Con respecto a la preparación de la explanada, dado que no se requiere un planteamiento específico, no se incide en la descripción de la misma, debiéndose seguir lo prescrito por la normativa española vigente. En cualquier caso, cabe recordar que esta técnica requiere de unos sobrecanchos, tanto por razones del apoyo de las extendedoras como de la adecuada maniobrabilidad de los equipos auxiliares (camiones volcadores frente a la primera extendidora y de la retroexcavadora para la alimentación de la segunda extendidora en los laterales).

#### 3.4.1.- Capa de regularización y soporte

Por encima de la coronación de la explanada debe situarse una capa con una doble función, por un lado de regularización y, por otro de soporte, a la capa estructural posterior, tal como se ha visto en el apartado 2.5.

En la Instrucción española 6.1 IC, ambas funciones (regularización y soporte estructural) radican en una capa de hormigón magro de 15 cm de espesor, con un sobrecancho de 15 cm por cada lado. Esta sobrecancho puede ser insuficiente para el apoyo de las extendedoras en la técnica que se plantea en este manual, por lo que en el caso de emplear la normativa española se propone en la capa de hormigón magro, un sobrecancho de 70 cm por cada lado, con la consiguiente repercusión económica del mismo.

En la experiencia austriaca, las funciones citadas asignadas resueltas en una capa de hormigón magro se desglosan en dos; así la *función de regularización* descansa en la capa de aglomerado de 5 cm mostrada en la figura 2.1 (la cual también cumple la función de impermeabilización,) y la *función de soporte* estructural, aparte de la capa anterior, se le asigna a una capa de regulación de un espesor, entre 20 y 25 cm, constituida por un material estabilizado con cemento, sobre la cual estarán apoyadas las capas posteriores del pavimento señaladas en la figura 2.1.

La primera capa, de un espesor de 5 cm tal como se ha dicho, es de mezcla bituminosa en caliente (aglomerado asfáltico) y, aparte de la función de regularización señalada, su función es proteger la explanada evitando que el agua que pudiera infiltrarse por las juntas y, que combinada con la acción del tráfico, pueda dañar la explanada disminuyendo su capacidad portante y su estabilidad, repercutiendo negativamente en la durabilidad del firme.

Un aspecto importante a destacar es que esta capa de aglomerado (al igual que si se utiliza la solución de hormigón magro) debe ser de un ancho superior al de las losas superiores, entre unos 70 – 100 cm de anchura por cada lado (función del trazado), con objeto de que las extendedoras y equipos de curado la usen como zona de rodadura (ver

figura 3.11). De esta forma se mejora el perfilado de la sección, permitiendo tener mejor control de los espesores de las diferentes capas.



*Figura 3.11.- Sobreancho de la capa asfáltica para zona de rodadura de los equipos*

Posteriormente y previo al comienzo de la ejecución del pavimento según la experiencia austriaca, se procede al montaje del cableado de nivelación y guía de los equipos de extendido y curado, a cada lado de la losa a construir. El cable se instala con la longitud que vaya a tener la construcción del tramo proyectado para la jornada concreta de trabajo. En el caso de seguir la Instrucción española IC-6.1 esta operación se debe realizar antes del extendido del hormigón magro.

El cable se coloca a 1.20 metros de ambos bordes de la losa (ver figura 3.12a), utilizando como estaca de nivelación, usualmente, un redondo de acero de unos 12 mm de diámetro (figura 3.12b), situados a una distancia de unos  $4 \pm 0,10$  m. Estas distancias dejan una plataforma de trabajo de (Ancho de la losa +  $(2 \times 1.20 \text{ m})$ ) por donde puedan circular los equipos participantes. El cable sirve de guiado de dichos equipos figura (3.12b). El sobreancho respecto al ancho de la losa puede reducirse en condiciones de contorno específicas como en tramos de ejecución en túneles, bajo puentes cerca de pilas, etc., en las que se cambien las dimensiones útiles.



*Figura 3.12.- Sistema de guiado: a) Ubicación de estacas y b) sistema de guiado*



### 3.4.2.- Extendido del hormigón y colocación de barras y pasadores

Después de la comprobación y limpieza de los diferentes equipos para garantizar el correcto y continuo funcionamiento de todos los elementos, se procede al extendido de las dos capas de hormigón, insistiendo en la importancia de que las pavimentadoras no se detengan.

La primera extendedora coloca el grosor correspondiente a la capa inferior del hormigón (hormigón de base) de un espesor definido en cada obra (si bien este puede ser variable en función del tipo de tráfico), y la segunda extendedora, dispuesta de manera coordinada con la primera y desfasada ligeramente respecto a la longitud a hormigonar, extiende el hormigón correspondiente a la capa de rodadura. Dicha coordinación debe asegurar un contacto en fresco, una buena adherencia entre ambas capas y una buena regularidad superficial.

En la figura 3.13 puede verse una vista superior de la configuración de los equipos de extendido. En ella se observa el camión volquete descargando el hormigón de la capa de base y la pala que suministra el hormigón de la capa de rodadura así como la tolva receptora y la cinta distribuidora.

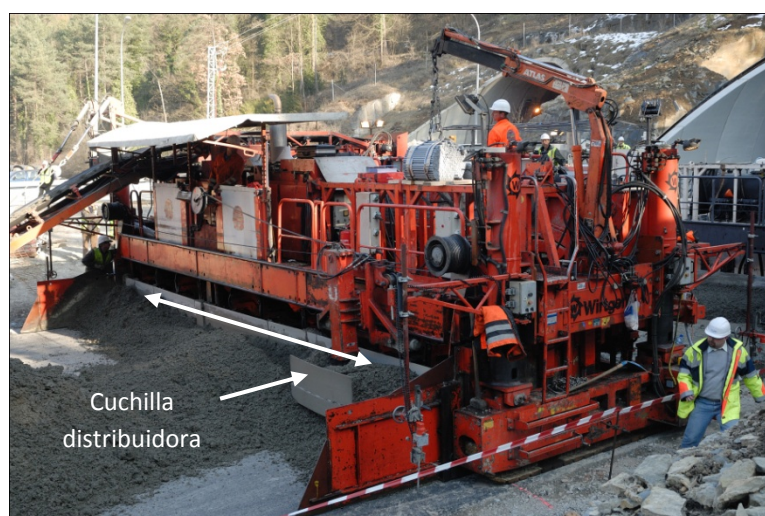


Figura 3.13.- Vista aérea del equipo de extendido y el suministro de los hormigones

La velocidad de avance del tren de construcción debe estar comprendida entre los 40 y los 60 metros lineales por hora. Cabe reflexionar sobre lo que ello significa en cuanto al hormigón, ya que para una capa de 20 cm y una anchura de 10,5 m, en la velocidad superior, implica 126 m<sup>3</sup>/hora para el hormigón de la capa de base, teniendo presente que

no todas las centrales amasadoras están dimensionadas para estos requerimientos. En el caso de que el ancho de las losas sea de 14,0 m, esto es, esté planteado para tres carriles, la cantidad requerida en ésta misma hipótesis para el hormigón de la capa de base, sería de 168 m<sup>3</sup>/hora.

En la figura 3.14 puede observarse el frente de la primera extendedora. Hay que resaltar que por razones organizativas, anteriormente mencionadas, se extiende por una determinada zona lateral, existiendo una cuchilla distribuidora en el frente de la extendedora, que distribuye el hormigón transversalmente.



*Figura 3.14.- Frente de la 1ª extendedora*

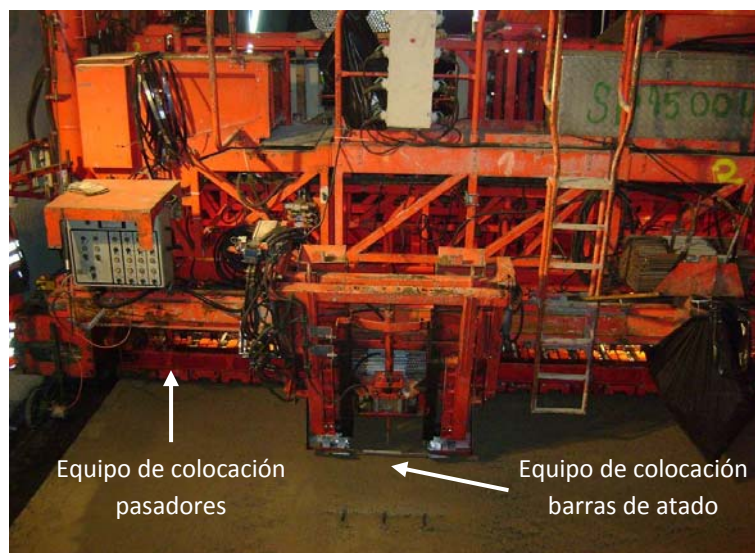
A la salida de la primera extendedora se disponen, de forma automática, los pasadores (en juntas transversales) y las barras de atado (en juntas longitudinales), tal como puede verse en la figura 3.15a, para el caso de los pasadores; mientras que en la figura 3.15b, puede verse el aspecto de la losa con los pasadores insertados, así como una barra de atado preparada para colocarse.



*Figura 3.15.- Barras longitudinales: a) Colocación y b) aspecto del hormigón*

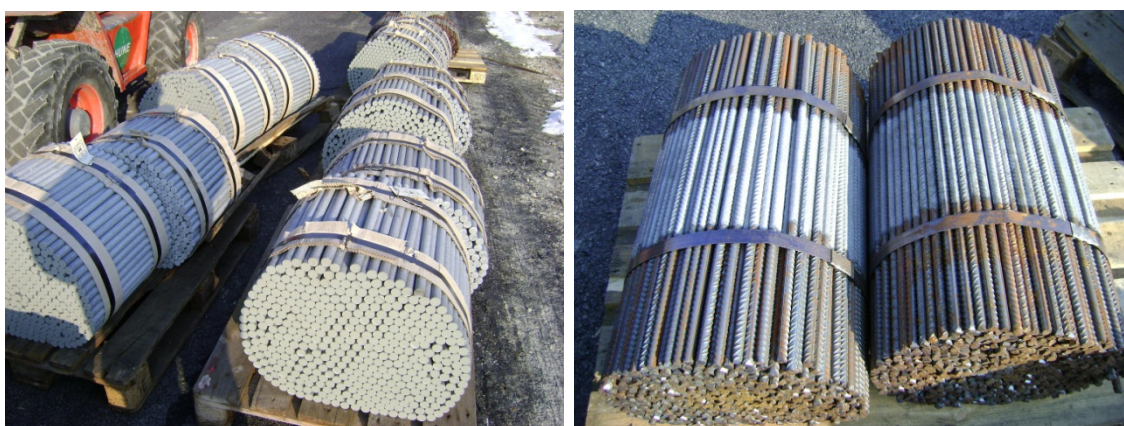


La colocación de las barras de atado (de acuerdo a los requerimientos de proyecto definidos en el apartado 2.6.2) se hace desde la parte posterior de la 1ª extendidora desde una posición situada inmediatamente después del equipo de colocación de los pasadores, tal como puede verse en la figura 3.16.



*Figura 3.16.- Equipo colocación de los pasadores y barras de atado*

Las barras de atado y los pasadores (figura 3.17), son de acero; en el caso de los pasadores son barras lisas y están totalmente protegidos en toda la superficie con una película antiadherente, siendo de menor longitud que las barras de atado (según el artículo 550 del PG3, los pasadores son de 500 mm, mientras que las barras de atado son de 800 mm), tal como puede verse en la figura 3.12b. En ella se observa que estas barras de atado son corrugadas estando protegidas en la parte central (donde se sitúa la junta).



*Figura 3.17.- Elementos de conexión: a). Pasadores y b) barras de atado*

Los diámetros de unos y otros, de acuerdo con el artículo 550 del PG3 son respectivamente, 25 mm en las barras longitudinales y 12 mm en los pasadores transversales. Las barras de atado y pasadores se colocan a una profundidad de la mitad

del espesor de la losa. Las secciones de ubicación de los pasadores, es decir, las zonas de situación de las futuras juntas transversales, deben quedar marcadas superficialmente en los laterales, acción que puede llevarse a cabo manualmente por operarios.

Hay que llamar la atención en que los espesores referidos es del total de la losa estructural bicapa de hormigón, lo que en la práctica, tras la primera extendedora y antes de la 2ª extendedora, la parte superior de los pasadores quedan a unos 6 cm de la superficie superior (en el caso de un pavimento de 20+5 cm) y a unos 7cm en el caso de las barras de atado, que pueden reflejarse en la superficie del hormigón de base extendido en la 1ª extendedora, tal como se observa en las figuras 3.15 y 3.16, anteriormente presentadas.

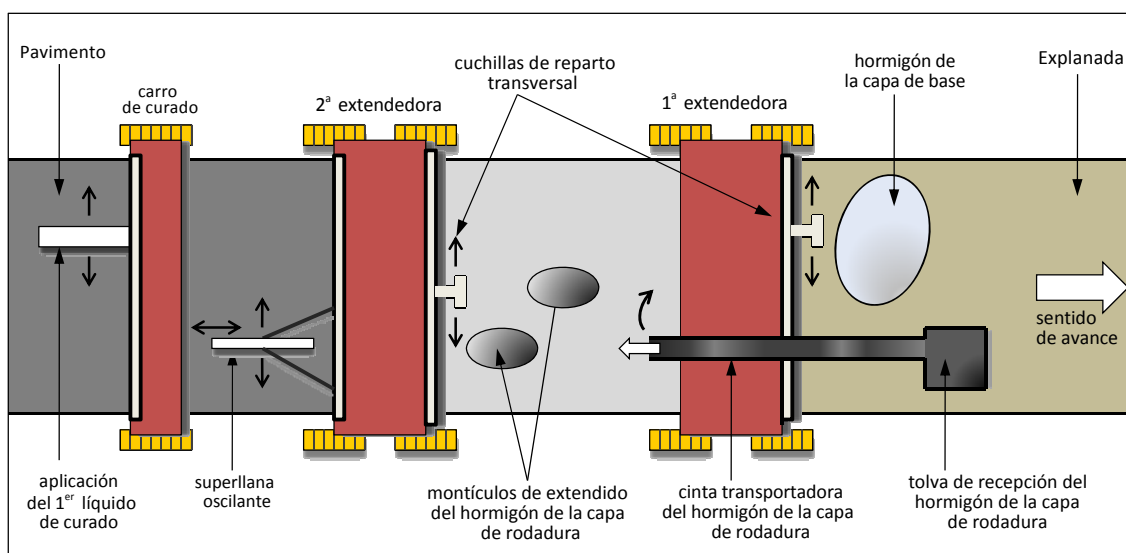
Después de la introducción de los diferentes pasadores y barras de atado para las distintas juntas se procede al extendido del hormigón de la capa de rodadura (segunda extendedora) sobre el hormigón de la capa de base. El hormigón de la capa de rodadura suele abocarse en forma de montículos sobre el espacio entre las extendedoras (4 - 6 metros), tal como puede verse en la figura 3.18. En el frente de esta 2ª extendedora, va montada otra cuchilla que distribuye el hormigón transversalmente. Cabe recordar que el hormigón llega por cinta a una parte lateral del frente de avance por razones de espacio anteriormente comentadas.



*Figura 3.18.- Frente de avance de la 2ª extendedora y hormigón de la capa de rodadura*

Puede ser importante, a efectos de garantizar la homogeneidad del reparto, que repercute en la homogeneidad superficial del pavimento, procurar que estos montículos no queden alineados en una misma posición lateral del eje central, ya que la regla transversal oscilante de reparto deberá hacer, consiguientemente, más trabajo de esparcido (con mayor probabilidad de trabarse por acopio excesivo o problemas de falta de material o por algún obstáculo, entendiéndose como tal, árido de tamaño mayor, por ejemplo), y pueden aparecer pequeños baches, debido a la mala distribución final, después

del pase de la segunda extendedora. Una alternativa, es poner un pivote al final de la cinta que distribuya mediante cuartos de círculo, tal como se muestra en la figura 3.19, lo que reduce la distancia a recorrer por el hormigón transportado por la cuchilla de reparto.



*Figura 3.19.- Vertido distribuido del hormigón de la capa de rodadura*

La velocidad de avance de esta segunda extendedora debe ser similar a la de la 1ª extendedora, por las razones comentadas anteriormente, si bien, dado que la capa de rodadura es de menor espesor, se precisarán centrales amasadoras que puedan garantizar en el entorno de 40 a 50 m<sup>3</sup>/hora.

Con posterioridad al extendido de la capa de rodadura y la compactación de la misma, se lleva a cabo un fratasado del hormigón mediante una regla dispuesta en la parte posterior de la 2ª extendedora, para dejar un buen acabado de esta superficie, tal como puede verse en la figura 3.20. La regla no sólo se desplaza transversalmente sino que el pivote de la misma tiene un desplazamiento limitado en la dirección longitudinal, fruto de los movimientos de los desplazamientos de los brazos soportes, tal como se muestra en dicha figura.

Por otro lado, en ésta figura puede verse, en un primer plano, un pequeño torno para ajuste del encofrado lateral deslizante, que se adapte a los cambios de curvatura del trazado.

Hay que enfatizar en la importancia que tiene dejar un buen acabado y alineado de esta superficie de la segunda capa por lo que adquiere gran importancia que los operarios dispuestos a tal efecto (por ejemplo referencia *PS* de la tabla 3.1) estén atentos a ello. En el caso de detectar alguna anomalía podrán repasar la superficie para poder corregir rápidamente los posibles defectos que surjan. Estos operarios se sitúan a cada lado de la losa y sobre el puente del equipo de curado (ver figura 3.20).





*Figura 3.20.- Fratasado del hormigón de la capa de rodadura*

Por otro lado, es importante diseñar el hormigón de la capa de rodadura adecuado a este sistema de puesta en obra, ya que es de gran importancia la consistencia y plasticidad del mismo, aportada por el esqueleto granular, la cantidad de agua, los aireantes y otros aditivos, si bien prestando atención a no emplear excesiva cantidad de plastificantes, con objeto de evitar posibles retardos de fraguado.

### **3.4.3.- Aplicación del inhibidor de fraguado y primer líquido de curado**

Posterior al correcto vertido, extendido y compactado, y después de terminar los posibles retoques, se procede al extendido, mediante pulverización, de una mezcla de dos líquidos: inhibidor de fraguado y 1<sup>er</sup> líquido de curado. En la figura 3.21a puede verse el equipo de vertido en zona descubierta, mientras que en la figura 3.21b puede verse en zona de túnel, pudiéndose observar fácilmente si queda bien distribuido o no.

El equipo de vertido se mueve transversalmente, tal como se observa en la figura 3.21b, donde se muestra una zona aún sin el inhibidor de fraguado y 1<sup>er</sup> líquido de curado. Por otro lado puede verse que existe una pequeña zona de superposición con la capa vertida anteriormente consecuencia del avance longitudinal de la entendedora. Con ello se pretende garantizar que toda la superficie queda cubierta.

El inhibidor de fraguado se introduce con objeto de que si bien la capa de rodadura ya esté endurecida, no sea así en una lámina muy superficial de unos 3 mm, como máximo, que pueda ser fácilmente barrida con posterioridad. El 1<sup>er</sup> líquido de curado se introduce para conseguir las prestaciones requeridas y no dejar momento alguno sin el curado necesario; ahora bien, las características de este líquido de curado, con respecto a las del curado de 2<sup>a</sup> fase, son diferentes, ya que esta capa se sacará a las primeras horas, por lo que sus prestaciones pueden ser inferiores a las correspondientes de 2<sup>a</sup> fase.



*Figura 3.21.- Carro para la aplicación del inhibidor de fraguado y primer líquido de curado:  
a) Vista general en zona abierta y b) detalle del extendido en túnel*

Esta actuación no requiere medidas personales de protección específicas (mascarillas, etc.) para los operarios (referencias E3 de la tabla 3.1), ya que el dispositivo está protegido (ver faldón de la figura 3.21) y como se ha visto en anteriores figuras, por ejemplo, figura 3.2, este carro se sitúa a continuación de la 2ª extendidora a pequeña distancia de la misma.

#### **3.4.4.- Barrido**

En función de la climatología y el fraguado del cemento, se procede, al cabo de unas horas (en el entorno de 6 horas), al denudado de la superficie de la losa mediante su barrido, consiguiendo una capa de rodadura con los áridos expuestos, y cumpliendo así los requisitos funcionales de textura y sonoridad, requeridos en proyecto.

Ello implica, usualmente, el empleo de una barredora potente (tal como se muestra en la figura 3.6, presentada con anterioridad) para una buena efectividad en la limpieza, lo que conduce a una gran cantidad de fino (polvo) que es preciso retirar, para lo que se recomienda una cuchilla motorizada como la de la figura 3.7, anteriormente presentada.

#### **3.4.5.- Segunda aplicación de líquido de curado**

El curado del pavimento es una operación fundamental para garantizar un adecuado comportamiento del mismo. Si no se realiza de forma apropiada, la resistencia del hormigón, especialmente en su superficie, puede verse muy afectada y en algunos casos, sobre todo en condiciones ambientales adversas (altas temperaturas, en climas secos y velocidades elevadas del viento), pueden producirse fisuraciones importantes.

Una vez terminada la limpieza de la superficie (cabe recordar que se está en las primeras 24 horas) debe continuarse con el curado para evitar la desecación prematura del hormigón con objeto de alcanzar las resistencias previstas en proyecto. El curado

podría hacerse con cualquiera de los métodos existentes: regado, productos filmógenos, cobertura con plásticos. En el caso de éste último, siendo posible no se recomienda por el riesgo de que vuelen en presencia de viento, con la consiguiente pérdida de rendimiento, costes añadidos e incidencia en el medio ambiente.

En el caso del riego con agua se requiere establecer una frecuencia de curado, con los consiguientes riesgos de incumplimiento en las obras, aparte de los costes ambientales. Por ello se recomienda el empleo de líquidos filmógenos de curado. El mismo se hace de en forma pulverizada, con el equipo mostrado en la figura 3.8, anteriormente presentada.

#### 3.4.6.- Corte de juntas

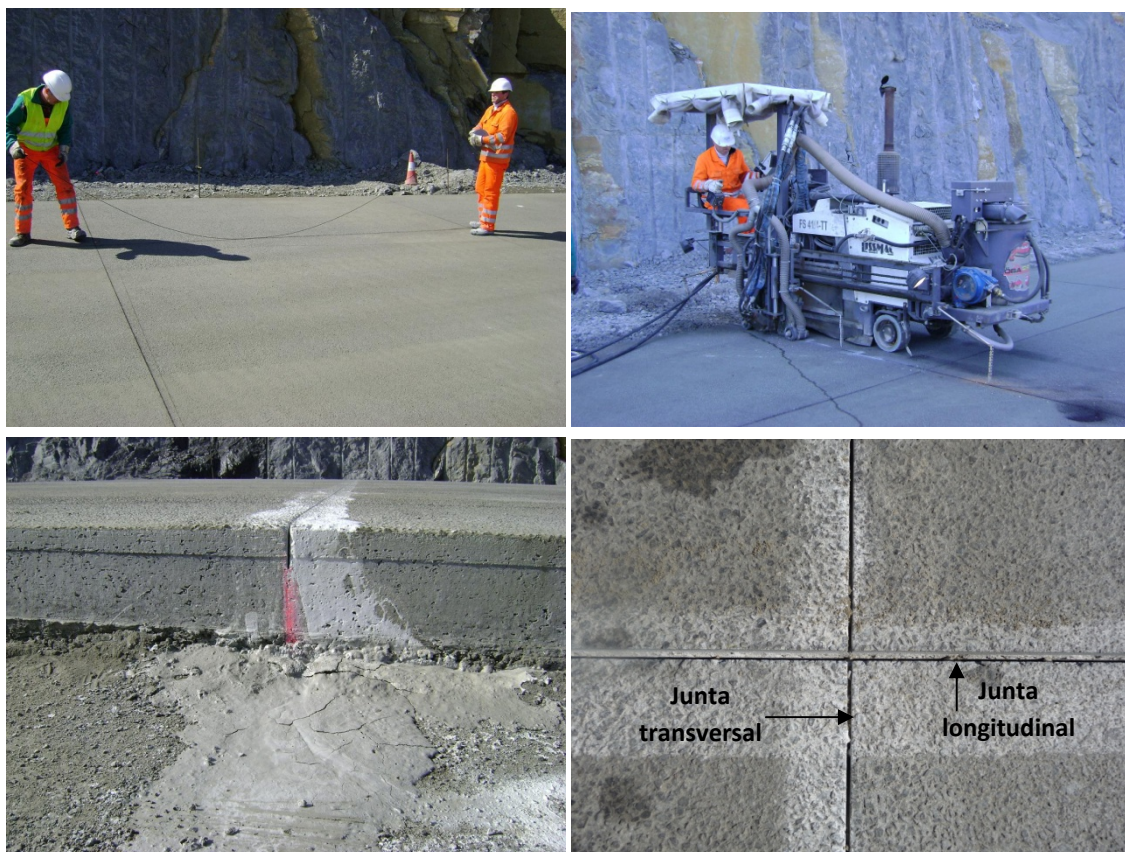
En función de la climatología, que influye en la madurez del hormigón a tempranas edades, pero generalmente con una edad del hormigón no superior a las 24 horas, se realiza el corte de juntas con sierra de disco, comenzando por las juntas transversales y, con posterioridad, las juntas longitudinales. Con ello se pretende reducir el riesgo de aparición de fisuras de retracción.

Las señales laterales de ubicación de los pasadores (a la mitad de la longitud particular de los mismos) indican la situación donde deben efectuarse las juntas transversales. Esto permite realizar el marcado de las mismas sobre el pavimento con cuerda de marcar tanto en las transversales como en las dos longitudinales, realizando la cuadrícula prevista en el esquema de disposición de juntas (figura 3.22a).

La máquina de serrado de las juntas transversales (figura 3.22b) realiza un sólo corte de 4 mm de ancho hasta la profundidad definida en el proyecto (ver apartado 2.6.1.a) tal como puede verse en la figura 3.22c. La máquina de serrado de las juntas longitudinales realiza un corte de 8 mm de ancho hasta la profundidad definida en el proyecto (ver apartado 2.6.1.c), mediante la instalación de dos discos de 4 mm sucesivos en el ancho de forma que uno de los dos llega a mayor profundidad. En la figura 3.22d puede verse la intersección de los dos tipos de juntas).

Con posterioridad al corte, tanto en las juntas longitudinales como transversales, se hace un biselado de los labios de la junta a 45 grados, en una profundidad de 2 mm. Con ello se pretende favorecer las operaciones de sellado y reducir el riesgo de rotura de los labios de la junta frente a la acción del tráfico





*Figura 3.22.- Corte de juntas: a) Marcado de retícula, b) Corte juntas transversales, c) Profundidad juntas transversales y d) Aspecto de cruce de juntas*

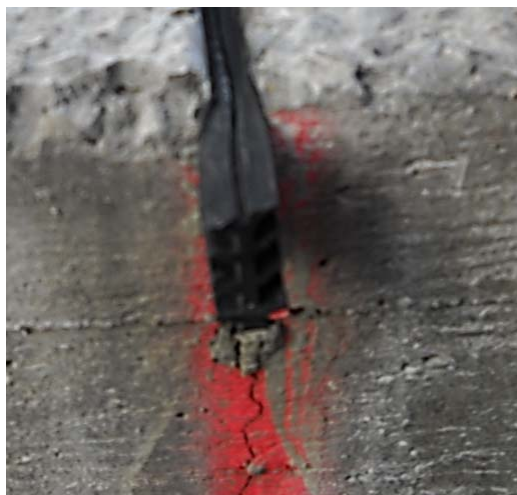
#### 3.4.7.- Sellado de juntas

El sellado de las juntas es necesario por diversas razones funcionales, durabilidad de la capa de rigidización y de la propia explanada, sin olvidar que con ello se evita que queden encajadas partículas en su parte superficial, y que éstas acaben causando una mayor abertura de la junta por el desgaste del paso reiterado de vehículos por encima o rotura por cambios térmicos.

Cuando el porcentaje de juntas transversales abierta (lo cual es visible en los bordes) es elevado (90%) se realiza el sellado de las mismas debiéndose proceder a una limpieza previa.

El material empleado en el sellado de las juntas depende del tipo de junta. Así en las juntas longitudinales se emplea un cordón elastomérico con un sellado posterior mediante un material de relleno bituminoso, mientras que en las juntas transversales se emplea esta misma solución en el caso de que la junta esté poco abierta o bien una solución con perfiles de plástico retráctiles de policloropreno o productos similares, colocados a presión, cuando la junta está bien abierta, entendiéndose por tal, cuando la fisura que se produce conecta con la junta previamente serrada, tal como puede verse en

la figura 3.23. Aunque depende de diversos factores (climatología, tipo de cemento, y otros), un valor medio del tiempo transcurrido entre el hormigonado y este momento puede situarse en el entorno de los 7 – 14 días.



*Figura 3.23.- Apertura de una junta serrada*

#### **3.4.8.- Juntas de fin de día**

El hormigonado de este tipo de pavimentos se hace de forma continua, usualmente, en jornadas discontinuas, por lo que se requiere disponer de juntas de fin de jornada. Ello responde además a razones de mantenimiento de equipos y a razones económicas de no doblar turnos, etc. En la zona donde se prevea el fin de la jornada se coloca una lámina plástica (figura 3.24a) desde la junta hacia la zona no hormigonada para la protección de la capa de aglomerado contra el hormigón sobrante que pudiera hacer pegotes y pudiese perder adherencia entre capas.

Al final de la jornada diaria se realiza una junta transversal de construcción con pasadores, mediante un encofrado con la altura de la losa de dos capas fijándolo al terreno, tal como puede verse en la figura 3.24b.

Cuando la primera extendedora llega al punto de corte, se hace avanzar el tren de extendido y se rellena de hormigón hasta la junta, sacando el hormigón sobrante por delante de ella (figura 3.24c) y eliminándolo (con la retroexcavadora del transporte parcial, por ejemplo, que lo carga al vertedero), procediendo a un acabado final de la junta de forma manual (figura 3.24d).

Al día siguiente se retira el encofrado y se perforan los taladros de los pasadores (en el canto transversal de la losa) con un equipo manual de perforación. Con posterioridad, se introducen los pasadores hasta la mitad de su longitud y la junta queda terminada para comenzar el extendido a partir de ella.





*Figura 3.24.- Juntas de final de jornada: a) Lámina protectora, b) encofrado transversal, c) eliminación de sobrante hormigón y d) acabado manual de la junta*

### 3.5.- INCIDENCIAS EN LA EJECUCIÓN

En la descripción de los equipos y también durante la explicación de las etapas propias de la ejecución de los pavimentos de hormigón bicapa, se han ido comentando ciertas incidencias posibles que pueden aparecer en la construcción de este tipo de soluciones constructivas. En este apartado se hace especial referencia a todas ellas, con las recomendaciones y propuestas de actuación adecuadas, a efecto de reducir el impacto negativo que pudieran llegar a causar y tratando de reencauzar la ejecución a los procedimientos normales que corresponda.

Las incidencias pueden ser fruto del incorrecto manejo de los equipos, especialmente las extendedoras y, en particular, con mayor repercusión, de la 2ª de ellas y disfunciones de los procesos de coordinación de las extendedoras, dejando más distancia de la debida y del propio hormigón, para lo que se requiere un buen diseño de los mismos.

De las incidencias del manejo de las extendedoras (pérdidas de nivelación o aparición de oquedades por mala distribución del hormigón, que pueden requerir del retroceso de los equipos) poco se puede decir salvo insistir en la importancia de la

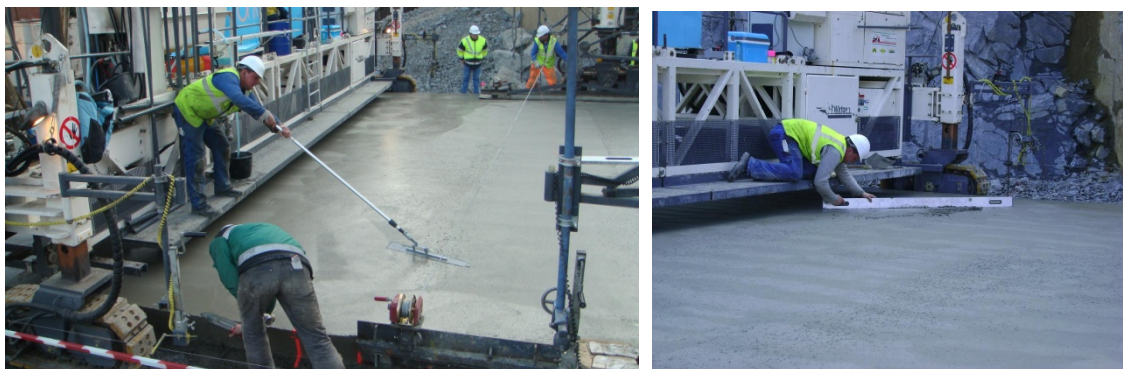
experiencia de los operarios o bien de una mejora del diseño del vertido de la masa del hormigón de la capa de rodadura para no verterlo de forma puntual sino distribuida como se ha mostrado en la figura 3.19. De entre el otro grupo de incidencias las más usuales son las debidas a:

- irregularidades en la superficie del pavimento, después del paso de la segunda extendidora (leve repercusión al ser fáciles de identificar y rectificar)
- la interrupción del extendido del hormigón (puede llegar a ser grave en el comportamiento último del pavimento).

### 3.5.1.- Irregularidades en la superficie del pavimento

Como se ha comentado, con posterioridad al paso de la 2ª extendidora (extendido del hormigón de la capa de rodadura) puede que la superficie de la losa presente irregularidades varias como baches o elevaciones (en definitiva, pérdida de nivelación) o coqueras. Este tipo de efectos deben detectarse cuanto antes, por operarios dedicados precisamente a ello durante la ejecución, y repararse manualmente de manera inmediata.

Para las coqueras se procederá lógicamente al rellenado de las mismas con hormigón sobrante (encima de la regla transversal oscilante, por ejemplo, siempre que aún tenga la humedad y consistencia adecuada) con un refinado manual de la zona (figura 3.25a). En la aparición de baches, posiblemente debidos a una acumulación excesiva del hormigón frente a la segunda extendidora o a un mal alisado puntual de la cuchilla de reparto, debe de nuevo rellenarse si es necesario y alisar de nuevo la zona mediante, por ejemplo, una regla de aluminio de 2 metros manejada manualmente desde el carro de curado por un operario, tal como puede verse en la figura 3.25b.



*Figura 3.25.- Corrección de irregularidades superficiales*

### 3.5.2.- Interrupción del extendido del hormigón

Ya se ha remarcado la importancia que tiene la continuidad del extendido de los hormigones y lo perjudicial que resulta el hecho de no ser así; precisamente la esencia del método constructivo del presente manual depende directamente de ello.

Las interrupciones del extendido del hormigón de la capa de base (primera extendedora) comportan la presencia de zonas susceptibles de fisuración al no existir la continuidad necesaria para la homogeneidad material requerida. De suceder, debe tenerse en cuenta esta consecuencia directa y prever en la sección de interrupción la ubicación de una junta transversal (con la colocación de pasadores pertinente). Si la parada se prolonga demasiado (horas), debe reconfigurarse el plan de trabajo y ejecutar una junta de fin de día, ya definida en el Apartado 3.4.9.

La incidencia quizá más relevante es la que refiere al caso de interrumpir el procedimiento de extendido del hormigón de la capa de rodadura (ver figura 3.26), esto es la separación excesiva entre extendedoras. Ello suele ser debido a la falta de suministro de la 2ª extendedora, ya sea por problemas técnicos, reajustes varios, mala coordinación en el traslado del hormigón de la planta al tajo, acumulación excesiva de material frente a la segunda extendedora, etc; en definitiva, problemas de coordinación de procesos, por lo que, como en toda obra que implica un hormigonado continuo se requiere una muy buena coordinación del trabajo, debiéndose favorecer la comunicación entre los distintos responsables de cada actuación, y siendo conscientes de la importancia que tiene dicha coordinación en el éxito final de la obra.



*Figura 3.26.- Excesiva distancia entre las dos extendedoras*

En cualquier caso, si aparece este tipo de problema se propone, para dar rigurosidad al método y asegurar, en consecuencia, los altos niveles de calidad requeridos, parar el extendido de la primera extendedora y retirar el hormigón de la primera capa y preparar una junta de fin de jornada, de acuerdo a lo visto con anterioridad.

Por otro lado, debe evitarse, una acumulación excesiva del hormigón de la capa de rodadura delante de la regla transversal oscilante (debido a un mal reparto del hormigón sobrante en la parte delantera de la segunda extendedora o una mala consistencia del



hormigón) ya que puede provocar tener que levantar o incluso retroceder la extendedora para una nueva redistribución del hormigón y logro de la cota final deseada de la capa superior.

Como conclusión frente a este tipo de incidencias cabe decir que se puede conseguir un acabado excelente de la losa, tal como se muestra en la figura 3.27, si el material disponible es uniforme y de calidad, y tanto o más importante, si cabe, que el suministro del mismo sea suficiente en toda la ejecución. Parece obvio remarcar otras restricciones como que la maquinaria sea la adecuada al caso y que goce de un buen estado, que el equipo humano sea competente así como que la ejecución se efectúe de manera apropiada.



*Figura 3.27.- Acabado de la capa de rodadura*

## CAPÍTULO 4

# MATERIALES

### 4.1.- INTRODUCCIÓN

Después de desarrollar todas las características correspondientes al proyecto y ejecución de los pavimentos bicapa de hormigón (capítulos 2 y 3 respectivamente), el presente capítulo pretende exponer y completar la información referida a los diferentes materiales requeridos para el desarrollo de este tipo de soluciones constructivas. En cualquier caso es conveniente tener presente, tanto las normativas nacionales (Ministerio de Fomento, 2003) como internacionales (AASHTO, 2005)

Los materiales y la información o características distintivas que son propias para los pavimentos bicapa de hormigón se desglosan en función del tipo y grupo constructivo al que pertenecen. Así pues, se dividen los materiales según sean los componentes que conforman el hormigón (cemento, áridos, aditivos, etc.), los hormigones mismos (base y rodadura), los componentes del curado, la mezcla bituminosa de regularización y otros materiales diversos (de empleo en las juntas).

Vale la pena destacar que parte de la información que se expone en este capítulo también ha sido analizada en el Capítulo 2 correspondiente al Proyecto de este manual,

aunque desde un punto de vista más global y teniendo mayormente en cuenta las consideraciones específicas y distintivas que tiene la solución propuesta.

## 4.2.- COMPONENTES DEL HORMIGÓN

A continuación se presentan los diferentes materiales y productos que conforman el hormigón estructural (pavimento) de la solución bicapa, específica de este manual, dejándose para el capítulo 7, materiales que podrían incorporarse a esta solución en un futuro no lejano, por ejemplo, áridos reciclados para el hormigón de la capa de base.

### 4.2.1.- Cemento

El conglomerante hidráulico en base cemento debe responder a las exigencias estructurales requeridas, intentando que la retracción sea lo menor posible, dada la elevada relación superficie/volumen que tiene este tipo de aplicaciones.

Por ello se recomienda utilizar cementos CEM tipo II (con adiciones) de categorías resistentes de 42,5 y velocidades variables de fraguado en función de circunstancias climáticas, así un tipo N para condiciones climáticas habituales en primavera y verano, mientras que se podrá emplear tipo R para condiciones de invierno. En cualquier caso deben cumplir la vigente Instrucción de Recepción de Cementos (RC, 2008). Las características principales a cumplir, son:

- Principio de fraguado sea superior a 120 minutos en aras a facilitar la puesta en obra sin que el hormigón empiece a tirar.
- Resistencia a flexotracción en probeta de mortero superior a 7 MPa a los 28 días, para cumplir con las especificaciones mecánicas requeridas (requerimiento de la experiencia austriaca)
- Superficie de finura Blaine máxima de 4.000 cm<sup>2</sup>/g, para reducir la retracción (requerimiento de la experiencia austriaca)

Por otro lado, es importante que el cemento no llegue a la central de hormigonado con temperaturas superiores a los 80 °C, para evitar situaciones de falsos fraguados, en definitiva, para evitar problemas en el hormigón. Asimismo, también se recomienda no usar cemento con adición de “filler” calizo para minimizar de este modo problemas de irregularidad en la superficie.

### 4.2.2.- Áridos

Los áridos constituyen el esqueleto granular del hormigón y corresponden a un porcentaje elevado de su peso total (en el entorno del 80%). Los mismos pueden ser de rodados o bien proceder de machaqueo. En cualquier caso deben aportar las

características correspondientes a la función que cumpla la capa donde se ubiquen. Así en la capa de rodadura, los áridos deben ser resistentes al desgaste en mayor medida que los áridos de la capa de base, tal como puede verse en la tabla 4.1; en consecuencia el origen mineralógico probablemente sea diferente. En la capa de base, los áridos pueden ser calizos, mientras que en la capa de rodadura pueden ser de otro origen: pórfidos, etc.,

En cuanto al número de fracciones y tamaño máximo del árido, la determinación viene dada, asimismo, por la función del tipo de hormigón (capa de base y capa de rodadura). Así para la capa de base pueden utilizar tres fracciones (arena, gravilla y grava) pudiéndose llegar a un tamaño máximo de 40 mm, si bien, usualmente se situará en 20 mm. Para la capa de rodadura se emplearán dos fracciones (arena y gravilla), con un tamaño máximo de 8 a 11 mm. Este valor viene dado por la textura que se quiera obtener tras el denudado.

El árido deberá cumplir las prescripciones contenidas en el Artículo 550 correspondiente a pavimentos de hormigón. Se define como **árido grueso** a la parte del árido retenida en el tamiz 4 mm de la UNE-EN 993-2, mientras que el **árido fino** corresponde a la parte del árido total cernida por el tamiz 4 mm y retenida por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.

La proporción de partículas silíceas del árido fino del hormigón de la capa de rodadura no será inferior al 35 % (NLT-371) y siempre procedente de un árido grueso cuyo coeficiente de pulimento acelerado sea superior a PSV50 (UNE-EN 1097-8). En cualquier caso, todos los áridos deberán satisfacer también la norma UNE-EN 12620 así como las percepciones físico-químicas del Artículo 28 de la Instrucción EHE (2008).

En la Tabla 4.1 se detallan los requisitos que deben cumplir los áridos para su adecuación tanto en la capa de base como en la de rodadura. En ella, aunque no se explicita, los áridos también deben ser resistentes a la acción de ciclos de hielo-deshielo así como no ser reactivos con los álcalis del cemento, ni contener partículas de grano fino (arcillas, limos) ni materia orgánica. En el caso del porcentaje de caras de fractura se limita a un 1% máximo de partículas totalmente redondas.

Tal y como especifica el Artículo 542.11 del PG-3, si el árido grueso empleado para la capa de rodadura, además de cumplir todas las prescripciones especificadas en la tabla 4.1 tuviera un valor del coeficiente de pulimento acelerado superior a 53 (PSV53; según UNE-EN 1097-8),

*“se abonará una unidad de obra definida como tonelada (t) de incremento de calidad de áridos en capa de rodadura y cuyo importe será el 10 % del abono de tonelada de hormigón de capa de rodadura, siendo condición para ello que esta unidad de obra esté incluida en el Presupuesto del Proyecto”.*

Características		Capa de base	Capa de rodadura
Tamaño máximo del árido (UNE-EN 12620)		3 fracciones: 1 con 40 mm y otra con 4 mm	8 ó 11 mm
Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4)		> 40 (SI <sub>40</sub> )	> 15 (SI <sub>15</sub> )
Categoría de graduación (UNE-EN 12620)	árido fino	G <sub>F</sub> 85	G <sub>F</sub> 85
	árido grueso	G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 90/15
Contenido máximo de finos pasa por el tamiz 0,063 mm (UNE-EN 933-3)	árido grueso	f <sub>1,5</sub>	f <sub>0,5</sub>
	árido fino	f <sub>10</sub>	f <sub>10</sub>
Equivalente de arena (UNE-EN 933-8)		> 75 (>80 en zona de heladas)	
Índice de las (UNE-EN 933-3)		< 35 (IL <sub>35</sub> ) en árido grueso	
Porcentaje de caras de fractura (UNE-EN 933-5)			> 90%, C90/1
Ensayo de desgaste de Los Ángeles (UNE-EN 1097-2)			< 15 (LA <sub>15</sub> ) para T00, T0 y T1 < 20 (LA <sub>20</sub> ) para T2
Ensayo de Pulimento acelerado (EN 1097-8)			> 56 (CPA <sub>56</sub> ) para T00 y T0 > 50 (CPA <sub>50</sub> ) para T1 a T31

(\*) en la experiencia austriaca el tamaño máximo se limita a 32 mm.

Tabla 4.1.- Características exigidas de los áridos en función de la capa a la que pertenezcan

#### 4.2.3.- Agua

Para el amasado y curado del hormigón suelen ser aptas la mayor parte de las aguas potables pero también hay aguas insalubres aptas para este fin. Deberán rechazarse todas las aguas que no cumplan las exigencias del Artículo 27 de la Instrucción EHE (2008) a menos que se justifique suficientemente que las propiedades del hormigón no se ven alteradas de forma perjudicial (bajas de resistencia superiores al 10%). En la práctica, dadas el alto nivel de exigencias de las centrales utilizadas, éstas están dotadas de agua suficientemente contrastada.

#### 4.2.4.- Aditivos en el hormigón

Todos los aditivos que se empleen, para mejorar prestaciones de los hormigones utilizados, deberán cumplir las exigencias del Artículo 29 de la Instrucción EHE (2008). Como norma general, debe evitarse el uso de aditivos en cuya composición intervengan cloruros, sulfuros, sulfitos u otros componentes químicos que puedan ocasionar o

favorecer la corrosión de los pasadores y las barras de atado. En la tabla 4.2 se presentan algunos de ellos, los de mayor probabilidad de empleo, con los comentarios y características fundamentales de cada uno.

Tipos de aditivos	Características (EN-934/2)
Reductores de agua y fluidificantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mantenimiento constante de la relación agua/cemento para el aumento de la trabajabilidad, o reducción de la relación agua/cemento manteniendo la trabajabilidad (aumento de la resistencia y durabilidad).</li> <li>• pueden tener un efecto secundario de retraso importante en el tiempo de fraguado del hormigón.</li> </ul>
Superplastificantes (reductores de agua de alta actividad)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• mismo efecto que los fluidificantes pero de forma más acusada.</li> <li>• permite reducir hasta un 30% los valores de la relación agua/cemento con una trabajabilidad aceptable.</li> <li>• específico en reparaciones que precisen una apertura rápida al tráfico dado que permiten conseguir resistencias elevadas a muy corta edad.</li> </ul>
Aireantes	<ul style="list-style-type: none"> <li>• aumento de la plasticidad y trabajabilidad de los hormigones, reduciendo la segregación y exudación en estado fresco.</li> <li>• mejora de la tixotropía de la mezcla, disminuyendo la caída de los bordes.</li> <li>• aumento de la impermeabilidad del hormigón, haciéndolo más resistente a las heladas.</li> <li>• el contenido del aire ocluido debe estar entre el 4 y el 6%.</li> </ul>

*Tabla 4.2.- Tipos de aditivos de uso frecuente y características generales*

Hay que insistir la importancia que en este tipo de aplicaciones tienen, los aireantes, tanto en estado fresco, para facilitar la puesta en obra (deslizado de los encofrados) y mantenimiento de forma tras el paso de los mismos, como en estado endurecido especialmente en condiciones de exposición a ciclos de hielo y deshielo.

En determinadas circunstancias climáticas adversas de bajas temperaturas sería posible utilizar aceleradores de fraguado para lograr una mayor rapidez en el desarrollo de la resistencia del hormigón.

#### 4.3.- CARACTERÍSTICAS DE LOS HORMIGONES

Antes de iniciar la obra se recomienda realizar un conjunto de pruebas para confirmar aspectos de dosificación de los áridos y comportamiento resistente adecuados (ver el Capítulo 5 relativo al Control de calidad). Ambos hormigones (**capa de base** y **capa de rodadura**) deberán tener una consistencia fundamentalmente seca.

En la tabla 4.3 se detallan las especificaciones precisas para los hormigones de la capa de base y de la capa de rodadura tanto con los criterios del PG-3 como también según la experiencia austriaca. Cabe decir que los valores requeridos de la resistencia a tracción indirecta implican hormigones de prestaciones mecánicas en el entorno de 45 MPa a compresión para la capa de rodadura.

Características del hormigón		NORMATIVA ESPAÑOLA (PG-3)		EXPERIENCIA AUSTRIACA	
		Capa de base	Capa de rodadura	Capa de base	Capa de rodadura
Contenido mínimo de cemento (Kg/m <sup>3</sup> )		300	400	400	450
Relación agua/cemento		< 0,46	< 0,46	no aplica	no aplica
Asiento (cm) del Cono de Abrams (EN-12350-2)		2 - 6	2 - 6		
Masa unitaria del total de partículas retenidas por el tamiz 0,125 mm de la UNE-EN 933-2 (kg/m <sup>3</sup> )		450	450		
Contenido de aire en el hormigón fresco (EN-12350-7)		de 4,5 a 6%	de 4,5 a 6%	de 4 a 6%	de 4 a 6%
Resistencia característica a flexotracción (N/mm <sup>2</sup> ) (EN-12390-5)	HF-5,0		> 5,0	(*)	(*)
	HF-4,5	> 4,5			
	HF-4,0	> 4,0			

(\*) en la experiencia austriaca se exige que el valor medio entre 3 resultados medido en el ensayo de tracción indirecta (UNE-EN 12390-6) sea superior a 3,5 y 4,2 N/mm<sup>2</sup> para las capas de base y rodadura respectivamente. También, para cualquier valor individual, el resultado debe ser superior a 2,5 y 3,2 N/mm<sup>2</sup> para las capas de base y rodadura respectivamente.

*Tabla 4.3.- Características exigidas de los hormigones del pavimento*

#### 4.4.- COMPONENTES DEL CURADO

Primero, como componente implícito en el proceso de curado del hormigón, se incluye aquí el líquido inhibidor de fraguado, que responde a un aditivo superficial del hormigón (no incluido en la tabla 4.3 precisamente por ser de aplicación superficial y no comprendido en la fabricación misma del hormigón). El líquido inhibidor de fraguado debe generar las características consecuentes siguientes en el hormigón (EN-934-2):

- aumento del plazo de trabajabilidad del material (diminución de las resistencias mecánicas a corta edad).

- proporción de la flexibilidad adecuada a las diferentes operaciones de extendido y compactación.

Aunque el uso del líquido inhibidor de fraguado se considere apto en cualquier temperatura ambiente, es prácticamente imprescindible usarlo en ambientes con temperaturas superiores a los 30 °C.

Para el curado propiamente dicho suelen utilizarse productos filmógenos que al secar forman una película impermeable al vapor de agua, impidiendo el desecado del hormigón. Los productos filmógenos son compuestos líquidos a base de barnices (disoluciones de resinas sintéticas o naturales en disolventes orgánicos) o de emulsiones (acuosas de resinas, ceras, parafinas o polímeros sintéticos).

Éstas últimas suelen utilizarse en condiciones extremas de mucho calor debido a que tienen una gran estabilidad frente a la acción de agentes químicos agresivos y son totalmente insalubres en agua; su coste es más elevado pero son de muy fácil y rápida aplicación (secan muy rápido) y las ventajas compensan el sobre coste. Suelen pigmentarse en blanco para conferirles un cierto aspecto reflectante y facilitar de esta manera la detección de las zonas donde no se haya extendido adecuadamente el producto.

Las principales características generales exigibles para los productos de curado son:

- capacidad de formar la película impermeable al vapor de agua.
- no deben reaccionar desfavorablemente con el hormigón.
- deben ser fácilmente pulverizables a la temperatura ambiente de puesta en obra.
- deben desaparecer progresivamente una vez transcurrido el período de curado.
- deben suministrarse listos para su aplicación.
- deben poder almacenarse durante un período prolongado sin que se deterioren.

Cabe decir que, tal y como se ha especificado en el proceso constructivo, existen dos procesos de curado: el primero, justo después del paso de la segunda extendidora, una vez acabados los retoques y para la realización del decapado; y el segundo, una vez el hormigón ha alcanzado un cierto nivel de endurecimiento y después del denudado, barrido y limpieza de la superficie. Lógicamente se tratará de invertir en un producto de curado de mejor calidad en el segundo proceso, que es el del curado definitivo.

Asimismo, la elección puede venir supeditada por condiciones particulares de la obra (condiciones climatológicas del entorno); por ejemplo, quizá no sea necesario invertir en un producto de curado muy sofisticado en tramos interiores de túneles. La elección de estos productos dependerá, pues, de las condiciones particulares de la obra, y



la dotación necesaria deberá ser superior a 250 g/m<sup>2</sup>. Los productos de curado deberán cumplir la Norma Europea EN-14754-1.

#### 4.5.- CAPA DE REGULARIZACIÓN Y/O SOPORTE

En la descripción del proyecto de los pavimentos bicapa de hormigón se ha especificado la posibilidad de construir tanto una capa de soporte de hormigón magro (conforme la Instrucción española) como la de adecuar la capa de coronación de la explanada mediante un espesor suficiente de suelo estabilizado con cemento y la instalación de una capa de regularización de mezcla bituminosa en caliente (experiencia austriaca). En la tabla 4.4 se presentan las características requeridas a cada una de ellas.

Componentes de las capas	Características/requisitos
<b>NORMA ESPAÑOLA (PG-3)</b>	
Hormigón magro (capa de soporte)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• contenido de cemento entre el 6 y 9 % respecto el peso seco de los áridos (dosificación no inferior a 140 Kg/m<sup>3</sup> de hormigón).</li> <li>• la masa unitaria del total de partículas cernidas por el tamiz 0,125 mm inferior a 250 kg/m<sup>3</sup>.</li> <li>• relaciones agua-cemento inferiores a 1,15.</li> <li>• entre 15 y 22 MPa de resistencia a compresión simple a los 28 días.</li> <li>• contenido de aire en el hormigón fresco menor del 5% pueden usarse áridos rodados con un tamaño máximo no superior a los 40 mm.</li> </ul>
<b>EXPERIENCIA AUSTRIACA (*)</b>	
Suelo estabilizado (capa de coronación de la explanada)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• la mezcla suele realizarse in situ o partir de un suelo adecuado.</li> <li>• porcentaje variable de cemento respecto al peso seco del suelo en función del tipo de suelo y plasticidad.</li> <li>• contenido apropiado de agua determinado mediante el ensayo Proctor modificado.</li> <li>• debe asegurarse una compactación y curado adecuados antes de la instalación de la capa de regularización 1,5 MPa de resistencia mínima exigible a compresión simple a los 7 días.</li> </ul>
Mezcla bituminosa en caliente (capa de regularización)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• compuestos por árido grueso, árido fino, "filler" y betún.</li> <li>• granulometría sensiblemente continua.</li> <li>• fabricación a temperaturas suficientemente elevadas (&gt; 150 °C) en función de la viscosidad del ligante puesta en obra a temperatura superior a la ambiente para poder garantizar una correcta extensión y compactación.</li> </ul>

(\*) en la experiencia austriaca, la explanada previa debe tener un módulo de rigidez superior o igual a 35 MPa.

*Tabla 4.4.- Características exigidas a las distintas capas*

En cuanto a la mezcla bituminosa en caliente (capa de regularización según la experiencia austriaca), ésta corresponderá a una mezcla tipo AC 16 ó AC 22 densa que deberá cumplir lo que prescribe para este tipo de mezclas bituminosas en caliente de tipo hormigón bituminosos el Artículo 542 del PG-3 según la OC.24/2008.

#### 4.6.- COMPONENTES DE LAS JUNTAS

##### 4.6.1.- Componentes de la unión de juntas

Como ya se ha comentado en otros apartados, las juntas deben diseñarse para poder transmitir las cargas de una losa a otra; y en función de estas cargas habituales para el tipo de junta se hablará de **pasadores** cuando el elemento permita los movimientos horizontales de contracción o dilatación de las juntas transversales pero pretenda maximizar la rigidez frente a los desplazamientos verticales relativos entre losas, es decir, esfuerzos de flexión; y de **barras de unión** o **de atado** cuando permita un cierto movimiento vertical entre las losas de diferentes carriles de tráfico (juntas longitudinales) pero restrinja al máximo los movimientos horizontales al estar bien adherido al hormigón. Las propiedades requeridas para ambos componentes de unión se exponen en la tabla 4.5.

Componentes de la unión de juntas	Características/requisitos	
	NORMATIVA ESPAÑOLA (PG-3)	EXPERIENCIA AUSTRIACA
Pasadores (juntas transversales)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barra lisa de acero tipo S-275 JR (norma EN-10025-2)</li> <li>• Dimensiones: 25 mm de diámetro y 50 cm de longitud</li> <li>• Recubrimiento mediante un producto bituminoso, grasa, pintura o funda de plástico (polietileno) que garantice la no adherencia al hormigón.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barra lisa de acero tipo S-275 JR</li> <li>• Dimensiones: 25 mm de diámetro y 50 cm de longitud</li> <li>• Protección de plástico total del pasador</li> </ul>
Barras de atado (juntas longitudinales)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barra corrugada de acero de clase B-400-S ó B-500-S</li> <li>• Dimensiones: 12 de diámetro y 80 cm de longitud.</li> <li>• Deben estar protegidos de la corrosión 20 cm en el centro de la barra (lugar donde se prolonga la junta longitudinal).</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Barra corrugada de acero de clase B-St-500-S ó St-37-2</li> <li>• Dimensiones: 14 mm de diámetro y 70 cm de longitud</li> <li>• Protección de plástico en toda la longitud de la barra</li> </ul>

Tabla 4.5.- Características exigidas para los componentes de unión de juntas

#### 4.6.2.- Componentes del sellado de juntas

Los materiales empleados para el sellado son: cordones elastoméricos y productos bituminosos de relleno para las juntas longitudinales, y perfiles retráctiles de extrusión para las transversales (aunque como se especifica en el capítulo 2 puede usarse los mismos materiales que para las longitudinales siempre que sea conveniente o factible). Lógicamente, estos materiales deben garantizar la estanqueidad de las juntas sin desprenderse de los bordes de las losas.

En la tabla 4.6 se especifican las características y requisitos fundamentales de cada uno de estos elementos. Por otro lado hay que señalar que todos los productos de sellado deberán cumplir las especificaciones de la norma EN-14188/1 y los proyectos por EN-14188/2 y 3.

Componentes del sellado de juntas	Características/requisitos
Cordones elastoméricos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Deben poder acomodarse a los movimientos de la junta hasta un 20 - 25% del ancho de la misma.</li> <li>• Deben ser altamente resistentes al ataque químico.</li> <li>• Suelen garantizar una vida en servicio de unos 20 años.</li> </ul>
Perfiles retráctiles	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Suelen ser fabricados en neopreno (policloropreno) o en EPDM (etileno-propileno-dietil-metilo).</li> <li>• Debe comportarse a compresión (extrusión a través de la junta) a lo largo de su vida útil, aún aumentando hasta un 40 % la apertura (ancho de los perfiles en proporción con la longitud de la losa y variaciones de temperatura esperadas).</li> <li>• En el proceso de instalación debe asegurarse de el material preformado no se estire más de un 5% ya que podría dar lugar a una reducción drástica de la vida útil.</li> <li>• Suelen garantizar una vida en servicio de unos 25 años (aunque este tiempo esta supeditados al cumplimiento de las especificaciones del producto y su correcta instalación).</li> </ul>
Productos bituminosos	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Apertura de las juntas suficiente (según proyecto) para su correcta instalación.</li> <li>• Suelen garantizar una vida en servicio de unos 5 - 10 años.</li> <li>• Debe garantizar una acomodación mínima del 5% de apertura.</li> </ul>

Tabla 4.6.- Características exigidas para los componentes de unión de juntas

## CAPÍTULO 5

# CONTROL DE CALIDAD

### 5.1.- INTRODUCCIÓN

Tras los distintos capítulos correspondientes a las prescripciones de proyecto, ejecución y materiales, resulta necesario, en un documento de estas características, incluir un capítulo relativo al control de calidad, máxime cuando se trata de experiencias pioneras que requieren una fase de estudio cara a consolidar el uso de esta técnica.

El objetivo del presente capítulo es proponer las bases fundamentales del sistema de control a emplear en este tipo de pavimentos, clasificándolo según las etapas del proceso de ejecución.

El documento que incluye el presente apartado tiene un carácter global y pretende dar una solución racional y viable a las tareas de control de calidad necesarias en toda construcción más o menos compleja, pudiéndose, obviamente, ampliar dichas tareas a niveles mucho más exhaustivos si fuese necesario. En el mismo se siguen las directrices del PG3, si bien se incorporan nuevas propuestas en los temas que aquel no contempla, las cuales están basadas en la experiencia austriaca.

## 5.2.- CONTROL DE LA EXPLANADA

De cara a la parte inferior de la explanada, habitualmente referida al propio terreno una vez efectuadas las tareas de desbroce correspondientes, se debe proceder a la determinación del recorrido longitudinal con una descripción visual somera, perfiles transversales, sondeos representativos a falta de perfiles geológicos previos y siempre que se tenga una cierta incertidumbre del material subyacente.

Para el control de calidad de la explanada sobre la que apoya la capa de regulación se proponen medidas que inciden en: la geometría, espesor y módulo de deformación:

Respecto a la geometría se propone tomar cotas, mediante topografía, cada 10-20 metros de recorrido longitudinal, requiriéndose de acuerdo al PG3 que la tolerancia entre la rasante real y la rasante teórica sea de  $\pm 20$  mm. Este valor en la experiencia austriaca es de  $\pm 30$  mm.

Asimismo se comprobará la regularidad superficial y el estado de la superficie sobre la que vaya a extenderse la capa de regularización, dejando para el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto el director de las Obras el que indique las medidas necesarias para obtener dicha regularidad superficial y en su caso como subsanar las deficiencias. En definitiva, pedir el nivel de requerimientos similar a otras situaciones, al no ser específico de esta tipología.

Si la superficie de apoyo del firme bicapa de hormigón se resuelve con hormigón magro, antes de la puesta en obra del hormigón, se colocará una lámina de material plástico como separación entre ambas capas. Las láminas de plástico se colocarán con solapes no inferiores a quince centímetros (15 cm). El solape tendrá en cuenta la pendiente longitudinal y transversal, para asegurar la impermeabilidad.

Con objeto de preservar la capa de apoyo, se prohibirá circular sobre ella, salvo al personal y equipos que sean imprescindibles para la ejecución del pavimento. En este caso, se tomarán todas las precauciones que exija el Director de las Obras, cuya autorización será preceptiva. En época seca y calurosa, y siempre que sea previsible una pérdida de humedad del hormigón, el Director de las Obras podrá exigir que la superficie de apoyo se riegue ligeramente con agua, inmediatamente antes de la extensión, de forma que ésta quede húmeda pero no encharcada, eliminándose las acumulaciones que hubieran podido formarse

El control del espesor se realizará mediante la extracción de testigos, en la zona del arcen, de acuerdo a la norma UNE-EN 12504-1. Si bien la experiencia austríaca no señala limitaciones al respecto, el PG3 propone que:

- Espesor medio  $\geq$  espesor de proyecto;
- $\leq 2$  testigos con espesor menor 10% proyecto

Por último, con relación al módulo de deformación, medido mediante ensayo de placa de carga o deflectómetro de impacto de acuerdo con NLT 357, se requiere tanto por el PG3 como por la normativa 6.1-IC un valor  $\geq 300$  MPa (para la explanada tipo E3), mientras que la normativa austriaca, para una explanada equivalente requiere un valor ligeramente superior  $\geq 350$  MPa. Para otro tipo de explanada E1 y E2, los valores dados por el PG3 pueden verse en la tabla 2.2 de este documento

### 5.3.- CONTROL DE LA CAPA DE REGULARIZACIÓN

El control de calidad la capa de regularización depende de la solución que se adopte para la misma. En el caso que se adopte una solución de una losa de hormigón magro (con funciones de reparto y regularización), las condiciones deben ser las que propone el PG3, si bien como se ha dicho en capítulos anteriores, en la solución propuesta en este manual, la capa de regularización se completa con una capa bituminosa de 5 cm siguiendo el planteamiento de la experiencia austriaca. En este caso, para el control de la capa bituminosa se proponen medidas que inciden en las características geométricas de la capa (rasantes y espesor de la misma) y por otro lado, en los materiales constituyentes de dicha capa.

Respecto a la geometría, al igual que para la explanada, se propone tomar cotas, mediante topografía, cada 10-20 metros de recorrido longitudinal, requiriéndose de acuerdo al PG3 que la tolerancia entre la rasante real y la rasante teórica sea de  $\pm 10$  mm. Este valor en la experiencia austriaca no se especifica.

El control del espesor se realizará mediante la extracción de testigos, en la zona del arcén, de acuerdo a la norma UNE-EN 12504-1. Como criterio, el PG3 (Artículo 542.10.2) propone que:

- Espesor medio  $\geq$  espesor de proyecto
- $\leq 2$  testigos con espesor menor 10% proyecto

mientras que la experiencia austriaca no señala limitaciones al respecto. El aumento del número de testigos responde a que, al ser la dimensión de esta capa significativamente menor que el correspondiente a la explanada, un valor del 10% es muy exigente, lo que podría entrarse en una dinámica de comunicación muy negativa en obra, sin que las características de la solución se viesen mermadas de forma significativa.

La densidad media obtenida no deberá ser inferior a la densidad especificada en el Artículo 542.7.1 del PG-3, que es del 97 % para grosores no superiores a 6 cm (el grosor de la capa de regularización debiera ser de 5 cm), ni bajar en más 2 puntos porcentuales al valor especificado en más de 3 individuos de la muestra ensayada.

Con relación al *material*, el PG-3 no señala indicaciones al respecto, en todo caso hay que pensar que se trata de una capa bituminosa más próxima a una capa de base, luego será de aplicación el Artículo 542.9 del PG-3 (según la OC.24/2008) para mezclas bituminosas en caliente.

El control de calidad de la capa de explanada y de regularización queda resumido y sintetizado por los procedimientos descritos en la tabla 5.1.

Elementos de control	Objeto del control	Procedimientos de control	Lote
<b>Materiales constituyentes</b>			
Materiales (áridos, betún...)	Comprobar que cumple las prescripciones técnicas exigidas y esperadas	Visual y toma de muestras para ensayos de identificación	Vigilancia continua y ensayos siempre que se considere necesario
Extensión del material	Comprobar que se cumplen las cantidades adecuadas (espesor y anchura) así como la temperatura y humedad ambiente	Visual	Vigilancia continua durante el terraplenado
Compactación del material (si se requiere)	Comprobar que se cumplen las pasadas de compactación necesarias	Visual	Vigilancia continua durante el compactado
	Control de la densidad seca y de la humedad	Toma de muestras aleatoria	Aproximadamente 5000 m <sup>2</sup> de tongada, o fracción diaria (menor de los casos)
<b>Capa de explanada</b>			
Geometría	Verificación de las dimensiones y trazado especificados en los planos y pliegos del proyecto (cotas de retranqueo del eje, anchura y pendiente transversal)	Visual, nivelación topográfica	Cada 10 – 20 metros de recorrido longitudinal
Explanada instalada	Comprobar que finalmente se han cumplido las resistencias mecánicas y módulos de rigidez requeridos	Ensayos de placa de carga o deflectómetro de impacto	Cada 10 – 20 metros de recorrido longitudinal
<b>Capa de regularización</b>			
Geometría	Verificación de las dimensiones y trazado especificados en los planos y pliegos del proyecto (cotas de retranqueo del eje, anchura y pendiente transversal)	Visual, nivelación topográfica	Cada 10 – 20 metros de recorrido longitudinal
Explanada instalada	Comprobar que finalmente se han cumplido las resistencias mecánicas y módulos de rigidez requeridos	Ensayos de placa de carga o deflectómetro de impacto	Cada 10 – 20 metros de recorrido longitudinal

*Tabla 5.1.- Características generales del control de la explanada, capa de regularización y materiales constituyentes*



En dicha tabla 5.1, se presentan los elementos que se controlan, el objeto de control en cada caso y los procedimientos de control utilizados. Asimismo se incluye la definición de lote utilizada en cada caso. En ella puede verse que también se introducen consideraciones sobre los materiales y el extendido de los mismos.

## 5.4.- CONTROL DE LOS HORMIGONES

### 5.4.1.- Previo al hormigonado

Antes del extendido del hormigón se debe cumplir lo exigido por el artículo 550.5.5 del PG-3 relativo a elementos guía y acondicionamiento de los caminos de rodadura para pavimentadotas de encofrados deslizantes.

Previo a la puesta en obra hay que realizar ensayos previos de los materiales que conforman el hormigón tanto en su lugar de origen como en su lugar de fabricación para garantizar que cumplen lo especificado en el Pliego de Prescripciones.

En la central de fabricación debe controlarse, previamente, que cumpla el volumen de suministro requerido, lo especificado en el artículo 71 de la EHE (en este artículo también se dan las prescripciones para el transporte y hormigonado en condiciones climáticas especiales) y el buen funcionamiento de los distintos equipos, en particular, la correcta calibración de los sistemas de dosificación de los distintos componentes.

En el proceso de fabricación, los materiales pueden dosificarse en peso y volumen, siendo recomendable el primer sistema para evitar heterogeneidades y dispersiones en las características del hormigón. Es importante también controlar la humedad de los áridos, en especial de la arena, para evitar contenidos de humedad por encima de +0.5% sobre el valor previsto, aspecto fundamental para la adecuada colocación del material. Periódicamente durante todo el proceso de fabricación, se prepararán probetas con el hormigón fabricado para su posterior ensayo de tracción indirecta y resistencia así como comprobaciones granulométricas, detallados a continuación.

Antes de comenzar las tareas de ejecución es necesario realizar pruebas de laboratorio para confirmar los siguientes aspectos relativos a las características de los hormigones:

- Combinación de áridos adecuados para conseguir los hormigones previstos, incluyendo los ensayos de los áridos y dosificación de pruebas. En el hormigón de rodadura se estudiará especialmente la discontinuidad de los áridos para conseguir la textura superficial, pruebas de dosificación del retardante con respecto al denudado posterior y medida de la textura superficial.
- Ensayos de resistencia a tracción indirecta mediante el ensayo brasileño según EN 12390-6 y de resistencia a compresión según EN 12390-3, a 3, 7 y 28 días,

estableciéndose una correlación entre las resistencias. El hormigón de la capa inferior ha de tener una resistencia a tracción indirecta superior a 3.5 MPa, mientras que en el hormigón de rodadura este valor es de 4.2 MPa (media de tres resultados en ambos casos).

- Respecto a las dosificaciones de los hormigones de ambas capas (base y rodadura) se deberán cumplir las siguientes consideraciones extraídas del PG3:
  - La identificación ponderal en seco de cada fracción de árido en la amasada
  - La granulometría de los áridos combinados por los tamices definidos en la norma UNE EN 933-2
  - La dosificación del cemento, la del agua y, eventualmente, la de cada aditivo referidas a la amasada (en masa o en volumen según corresponda)
  - La consistencia del hormigón fresco y el contenido de aire ocluido
  - La resistencia característica a flexotracción a 7 y 28 días, siendo preceptivo la realización de ensayos para cada fórmula de trabajo con objeto de comprobar que los materiales y medios disponibles en obra permiten obtener un hormigón con las características exigidas. Los ensayos se llevarán a cabo sobre probetas procedentes de seis amasadas diferentes, confeccionando dos series de dos probetas por amasada, según UNE 83.301, admitiéndose para ello el empleo de una mesa vibrante. Dichas probetas se conservarán en las condiciones previstas en la citada norma, para ensayar a flexotracción<sup>1</sup>, según la UNE 83.305, una serie de cada una de ellas a las edades citadas.
  - La resistencia de cada amasada a una cierta edad se determinará como media de las probetas confeccionadas con hormigón de dicha amasada y ensayadas a dicha edad. La resistencia característica se determinará de acuerdo a lo prescrito en el articulado de la instrucción EHE 08.
  - Si la resistencia característica a 7 días resultara superior al 80% de la especificada a 28 días y los resultados del contenido de aire ocluido y de la consistencia estuviesen dentro de los límites establecidos, se podrá proceder a la realización de un tramo de prueba de ese hormigón. En caso contrario se deberá esperar a los 28 días y, se introducirán los ajustes necesarios en la dosificación y se repetirán los ensayos de resistencia.
  - Si la marcha de las obras lo aconsejase, se podrá exigir la corrección de la fórmula de trabajo, que se justificará mediante los ensayos oportunos. En todo caso, se estudiará y aprobará una nueva fórmula siempre que varíe la procedencia de alguno de los componentes, o sí, durante la producción, se rebasasen las tolerancias establecidas.

<sup>1</sup> Este ensayo suele conducir a valores altos de la dispersión. Por ello se puede plantear como alternativa el ensayo Barcelona de doble punzonamiento (UNE 83.515) (Saludes (2006), García (2008) y Molins *et al.* (2009). En este caso habrá que establecer las correlaciones correspondientes con la resistencia a compresión.

#### 5.4.2.- Ensayos de control durante el hormigonado

En lo que sigue se definen los criterios de supervisión relativos al control de calidad a efectuar durante el hormigonado de estos pavimentos, diferenciando entre las diferentes etapas del proceso: fabricación, transporte y puesta en obra.

##### Fabricación y transporte del hormigón

Durante la fabricación y transporte del hormigón se debe cumplir lo exigido por el artículo 550.5.3, 550.5.4 y 550.5.9 del PG-3 relativos a:

- Acopio de áridos
- Suministro y acopio de cemento
- Acopio de aditivos
- Amasado del hormigón
- Transporte del hormigón
- Control de procedencia de los materiales
- Control de calidad de los materiales

##### Puesta en obra del hormigón

Durante la puesta en obra del hormigón se debe cumplir lo exigido por el artículo 550.5.6 al 550.5.10 y 550.5.8 del PG-3 relativos a:

- Control de ejecución
- Colocación de los elementos de las juntas
- Puesta en obra del hormigón
- Acopio de los líquidos de curado
- Terminación con pavimentadora de encofrados deslizantes, incluidos bordes
- Textura superficial
- Numeración y marcado de las losas
- Protección y curado del hormigón fresco
- Ejecución de juntas serradas
- Sellado de juntas

En la puesta en obra es fundamental controlar la temperatura y humedad relativa del ambiente y tomar las precauciones pertinentes a cada caso. Debe evitarse el

endurecimiento prematuro y la desecación rápida de la superficie de pavimento ejecutada así como el congelamiento del agua libre del hormigón fresco.

En tiempo caluroso es recomendable la utilización de un retardador de fraguado, especialmente cuando se esté hormigonando por semianchos, o incluso bajo tráfico, con el fin de evitar la formación de juntas frías.

Debe controlarse todas las fases de ejecución para asegurar un ajuste óptimo a lo detallado en los pliegos de prescripciones, a las indicaciones del jefe de obra y las normas pertinentes. El extendido del hormigón debe realizarse, siempre que sea posible, por anchos completos y de forma continua, debiéndose disponer de juntas de trabajo siempre que se produzcan interrupciones superiores a una hora. Este plazo puede ampliarse en el caso de que se utilicen retardadores de fraguado.

Debe efectuarse también una nivelación del pavimento en obra (medidas cada 10-20 metros en dirección y sentidos longitudinal y transversal) que asegure su correcto emplazamiento y geometría, así como un seguimiento visual continuo durante la ejecución del extendido de la capa de rodadura para localizar y reparar posibles irregularidades superficiales.

Es importante llevar un control de la secuencia temporal de la ejecución de la obra (conforme al plan de trabajo preestablecido), de las condiciones meteorológicas previstas en varios días sucesivos (con tiempo de reacción para casos particulares), y de las posibles incidencias de calidad y puesta en obra (interrupciones, reparaciones, etc.), con indicaciones de detalle, que puedan surgir.

## **5.5.- CONTROL DEL PAVIMENTO ACABADO**

Una vez acabada la ejecución, previa apertura del tráfico debe realizarse un control exhaustivo de los posibles desperfectos e irregularidades superficiales (grietas, baches, asentamientos, etc.) en el firme, de manera lo más inmediata posible para poder proceder a su reparación (Capítulo 6). Es muy importante, pues, la identificación de irregularidades y desperfectos en la superficie del firme, así como asegurar su adecuada textura y agarre. Para el control de la textura superficial se llevará a cabo mediante ensayos puntuales de Círculo de arena.

### **5.5.1.- Aspectos de control**

Un factor principal del control del pavimento acabado es la identificación de irregularidades y desperfectos en la superficie del firme, así como asegurar su adecuada textura y agarre. También es importante un control de la adherencia entre las distintas capas que conforman el firme, por lo que deberán extraerse testigos y efectuarse ensayos a

corte directo, en los casos en que sea posible, entre las dos capas de hormigón del pavimento como adherencia quizá más significativa.

A continuación se definen los diferentes aspectos de control que, según el Artículo 550.7 del PG-3, deben comprobarse una vez finalizada la ejecución de la unidad (pavimento acabado), y que pueden clasificarse en la apertura de juntas, la resistencia estructural del pavimento, los criterios geométricos de diseño, la regularidad y la textura superficial, la resistencia al deslizamiento y la integridad de las losas.

- **Apertura de juntas**

Se llevará a cabo un plan de control completo de la formación y apertura de juntas, dobiéndose supervisar la secuencia temporal de formación de las mismas durante la ejecución. Asimismo se deberá realizar también un cierto control periódico de la evolución (apertura y degradación; inspección visual y mediante galgas) de las juntas de contracción transversales y longitudinales.

- **Resistencia estructural**

La resistencia característica a flexotracción a veintiocho días cumplirá lo indicado en el proyecto para ambas capas.

- **Alineación, rasante, espesor y anchura**

Las desviaciones en planta respecto a la alineación teórica no deben ser superiores a 3 cm, y la superficie de la capa debe tener las pendientes indicadas en los planos de proyecto. La rasante de la superficie acabada no debe quedar por debajo de la teórica en ningún punto. El espesor del pavimento no puede ser inferior, en ningún caso, al previsto en la tabla de secciones tipo (tabla 2.3 anteriormente presentada). En todos los perfiles se debe comprobar la anchura del pavimento, que en ningún caso podrá ser inferior a la teórica deducida de la sección tipo.

- **Regularidad superficial**

El Índice de Regularidad Internacional (IRI) según la NLT-330, no debe superar los valores indicados en la tabla 5.2 (acorde con la Tabla 550.3 del PG-3). Por otro lado, tal y como señala el Artículo 542.11 del PG-3, para firmes de nueva construcción con posibilidad de abono adicional, si los resultados de regularidad superficial de la capa de rodadura mejoran los valores expuestos en la tabla 5.2,

*“se abonará una unidad de obra definida como tonelada (t), o en su caso metro cuadrado (m<sup>2</sup>), de incremento de calidad de regularidad superficial en capa de rodadura y cuyo importe será del 5 % del abono de tonelada de hormigón de capa de rodadura o en su caso, de unidad de superficie, siendo*

*condición para ello que esta unidad de obra esté en el Presupuesto del Proyecto”.*

Porcentaje de hectómetros	Tipo de vía	
	Calzadas de autopistas y autovías	Resto de vías
50	< 1,5	< 1,5
80	< 1,8	< 2,0
100	< 2,0	< 2,5

*Tabla 5.2.- Clasificación del Índice de Regularidad Internacional en mm/m*

Cabe especificar que los valores límite del IRI presentados en la tabla 5.2 (NLT-330) se refieren a límites de carácter global, aunque seguramente definidos bajo consideraciones específicas respecto al supuesto de los pavimentos de naturaleza bituminosa (flexibles). Por lo general, los valores de IRI obtenidos para pavimentos bituminosos suelen ser más bajos que los encontrados para pavimentos de hormigón (Perera, 2002; Solminihac, 2003; Allen, 2006), lo cual puede ser consecuencia de la mayor rigidez del hormigón como material y de las curvaturas que pueden aparecer en las losas por efectos térmicos. A pesar de ello, otros estudios han comprobado que pavimentos de hormigón con IRI más elevado pueden conducir a un índice de confort y de desempeño similar a los pavimentos de asfalto con IRI más bajo (Solminihac, 2003).

De este modo, para uniformizar los niveles de requerimientos definidos para diferentes tipos de pavimentos, se podría aplicar un coeficiente reductor o bien definir límites más elevados para el IRI de los firmes de hormigón. Esa última alternativa incluso ya tiene precedentes en E.E.U.U donde, por ejemplo, existen especificaciones que establecen valores de IRI inicial iguales a 1,03 mm/m (65 pulgadas/milla) para los pavimentos rígidos y 0,47 mm/m (30 pulgadas/milla) para los pavimentos flexibles (Smith, 1997; Perera, 2002). En línea con esas especificaciones, la actualización de los límites de control del IRI en la norma existente en España puede ser interesante a medida que se extienda la construcción de los pavimentos rígidos bicapa.

Por último, cabe matizar que existen otros factores que influyen en el IRI, tal como, la época del año, la hora del día, pavimentos cubiertos o no (túnel o no), etc (Perera, 2002). Por ello, se requiere una adecuada selección de las condiciones de contorno en las que se realiza la medición del IRI, así como una correcta interpretación del resultado obtenido.

- **Textura superficial**

Tal y como señala el Artículo 550.7.4 del PG-3, la superficie de la capa debe presentar una textura uniforme y exenta de segregaciones. La profundidad de la textura

superficial, determinada por el método del Círculo de arena, debe estar comprendida entre 0.60 y 0.90 milímetros (NLT-335)

- **Resistencia al deslizamiento**

Actualmente no existe una normativa específica para la resistencia al deslizamiento en pavimentos de hormigón. Previsiblemente no se tiene en consideración porque, al ser dicha solución de naturaleza mucho más rígida que las de tipo bituminoso, debería, consecuentemente, adoptar valores de resistencia al deslizamiento mucho mayores y con un carácter más duradero.

Aún así se cree conveniente hacer referencia a los valores exigidos para los pavimentos flexibles en el Artículo 542.7.4 del PG-3 que limitan al 65 % los valores de CRT una vez transcurridos dos meses de la puesta en servicio del pavimento (NLT-336). Pero, al igual que como ocurre con los valores del IRI ya comentados, la época del año en la que se efectúen los ensayos de auscultación para el control del pavimento acabado puede dar lugar a variaciones importantes de los resultados (Navarro, 2010), lo que hace necesario un cierto criterio de selección y un análisis global de los resultados.

- **Integridad**

Las losas no deben presentar grietas, salvo las excepciones consideradas en el Artículo 550.10.2 del PG-3, resumido en el siguiente apartado correspondiente a los criterios de aceptación.

### 5.5.2.- Criterios de aceptación o de rechazo

A continuación se expresan los criterios de aceptación y rechazo para los aspectos de control definidos en el apartado anterior, conforme al Artículo 550.10 del PG-3:

- **Resistencia estructural**

Tal y como especifica el Artículo 550.10.1, a partir de la resistencia característica estimada a flexotracción, se aceptará el lote siempre que lógicamente se cumpla dicha resistencia. En caso contrario (con particularidades en función del porcentaje de la resistencia real obtenida; ver el Artículo 550.10.1.1 del PG-3) se deberá proceder a la realización de ensayos de información mediante la extracción de testigos antes de aproximadamente 2 meses de la puesta en obra (Artículo 550.10.1.2 del PG-3), con susceptibilidad de demolición y reconstrucción del lote para valores inferiores al 70 % del valor medio de la resistencia resultante obtenida de ensayos de tracción indirecta (UNE 83302).



- **Espesor**

Los criterios de espesor serán acorde con el Artículo 550.10.3 del PG-3. El Capítulo 9 correspondiente al Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fija las penalizaciones a imponer consecuentes a la falta de espesor.

- **Regularidad superficial**

Los resultados de la regularidad superficial no excederán de los límites especificados en el apartado anterior (acorde con el Artículo 550.7.3 del PG-3). De ser así, para resultados excedidos de los límites establecidos (tabla 5.2) en menos de un 10 % de la longitud del tramo controlado o en la longitud total de la obra, se procederá a efectuar las actuaciones de renovación superficial más adecuadas (básicamente fresado o cepillado; ver el Apartado 6.3.2). En caso de superar los límites en más de un 10 % de dicha longitud, se procederá a la demolición y reconstrucción del lote.

- **Textura superficial**

Tal y como especifica el Artículo 550.10.5 del PG-3, la profundidad media de la textura superficial deberá ser mayor de 0,7 milímetros según ensayos del Círculo de arena (NLT-335), y ningún de los resultados individuales puede ser inferior a 0.50 milímetros. De excederse los valores límites establecidos se procederá a su corrección mediante las actuaciones de renovación superficial más adecuadas (Apartado 6.3.2).

- **Integridad**

Los bordes de las losas y los labios de las juntas que presenten desconchados serán reparados con resina epoxi. Es siempre conveniente el sellado inmediato de todo tipo de grietas y fisuras. En caso de existencia de grietas no ramificadas y paralelas a la junta de la losa, ésta podrá ser aceptada si la junta más próxima a la grieta no se hubiera abierto, procediendo a tareas de reconstrucción parcial (instalación de pasadores o barras de unión) con posterior sellado y cajeo de los labios. Si la junta más próxima se hubiera abierto, se inyectará resina epoxi lo antes posible, manteniendo la unión de los labios y restableciendo la continuidad de la losa. Para otros tipos de grietas (en esquinas, por ejemplo) se procederá a la inyección de resina epoxi siempre que sea de baja afectación, o a la demolición y reconstrucción pertinente para los casos con mayor grado de afectación.

## CAPÍTULO 6

# CONSERVACIÓN

### 6.1.- INTRODUCCIÓN

Una vez se han establecido los pasos, tanto de proyecto como de construcción, para los pavimentos bicapa de hormigón, se requiere avanzar en otra fase como es la gestión del pavimento en servicio. En consecuencia, el presente capítulo pretende ser de ayuda en la organización de tareas de mantenimiento y de gestión de este tipo de pavimentos.

El tema va muy ligado a algunos de los aspectos anteriormente tratados, especialmente los correspondientes a los Materiales y el Control de Calidad, siendo en muchos casos difícil su delimitación; lo cual se intenta, mirando al mismo tiempo de estar perfectamente acorde con los temas mencionados. Hay que recordar que si la ejecución ha sido cuidada, probablemente la conservación requerirá un menor esfuerzo, mientras que si no ha sido así, el esfuerzo aumenta.

En todo tipo de construcciones es propio el envejecimiento y degradación con el transcurso del tiempo, tanto de la obra en general como de ciertos elementos que la componen. Todas las actuaciones enfocadas a paliar y restituir este tipo de degradaciones debidas al paso del tiempo y servicio de la construcción deben ser consideradas como tareas de conservación. Los pavimentos bicapa de hormigón no son una excepción y requieren, además, de estrategias precisas para el correcto desarrollo de estas tareas.

Las distintas actuaciones de conservación de firmes tienen como objetivos garantizar:

- Una adecuada resistencia al deslizamiento que proporcione una seguridad suficiente en la circulación.
- Una adecuada regularidad superficial acorde con el trazado de la vía y las velocidades de circulación establecidas para los vehículos a fin de proporcionar una rodadura cómoda para el usuario.
- Una capacidad estructural suficiente para el tráfico de vehículos (intensidad y tipología) que ha de soportar la carretera en servicio.

El objetivo general de las tareas de conservación consiste, pues, en alargar al máximo la vida de la construcción, manteniendo unos criterios mínimos de calidad técnica que garanticen la seguridad y comodidad del usuario.

Aún pareciendo de importancia secundaria respecto al proyecto y ejecución, las actuaciones de conservación (de carreteras) ocupan un lugar fundamental en el desarrollo económico y social de un país, ya sea por la propia explotación de las mismas como por el importante valor patrimonial al que refieren. Por ello, es altamente recomendable la elaboración de una estrategia de conservación desde el momento de proyecto mismo, logrando de este modo, si la estrategia es buena, una vida más larga de la vía con un menor coste.

Aunque el capítulo procura enmarcar el temario en los firmes ejecutados según el procedimiento descrito en el presente documento, la conservación de los pavimentos bicapa de hormigón engloba inevitablemente otros componentes de la carretera como son la propia explanada, los sistemas de drenaje, la señalización y el balizamiento, así como también las posibles interfases con otras estructuras (puentes, estructuras de contención, etc.) y particularidades del trazado (taludes, paso por túneles, etc.).

Todas las recomendaciones y procedimientos que se desarrollan en este capítulo tienen como criterio la adecuación a la *NORMA 6.3 - Rehabilitación de firmes* de la Instrucción de Carreteras (Ministerio de Fomento de España). Las características generales de los materiales y de las unidades de obra deberán ser las definidas en el articulado del Pliego de Prescripciones Generales para Obras de Carreteras y Puentes (*PG-3*) o del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Conservación de Carreteras y Puentes (*PG-4*).

## 6.2.- GESTIÓN DE LA CONSERVACIÓN

### 6.2.1- Introducción

La gestión de la conservación de los pavimentos bicapa de hormigón hace referencia a todas las tareas empleadas para lograr unos objetivos de funcionalidad, durabilidad y explotación determinados.

En relación a las actividades de conservación de firmes y carreteras, la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económico, en 1987, define la gestión intrínseca como:

*“el procedimiento consistente en coordinar y controlar todas las actividades encaminadas a conservar los firmes de carreteras, asegurando la mejor utilización posible de los recursos disponibles, es decir, haciendo máximo el beneficio para la sociedad”.*

Así pues, parte de las actividades que comprende la gestión deberán contemplarse desde el mismo momento de realización del proyecto constructivo, y respetarlas o modificarlas según el caso y en función de ciertas particularidades, a lo largo de la vida útil prevista para la estructura.

Las actividades esenciales para llevar a cabo una correcta gestión de los pavimentos bicapa de hormigón son la definición de una estrategia de conservación adecuada al caso a ejecutar (con una evaluación económica realista, la evaluación de modelos de comportamiento, etc.), la disposición de una base de datos robusta y actualizada, las actuaciones referentes a inspecciones visuales periódicas de la estructura con un catálogo preciso y ordenado de los deterioros que se vayan produciendo en servicio y la auscultación periódica con aparatos que faciliten datos empíricos cuantificables del estado del firme. A continuación se desarrollan con mayor detalle cada una de los conceptos y tareas enumeradas.

#### **6.2.2.- Estrategias de actuación**

Las estrategias de actuación hacen referencia a la organización y decisión de los procedimientos previstos para la explotación de la carretera, mantenimiento periódico y resolución de las diferentes incidencias que puedan ocurrir (daños).

Como se ha comentado, es altamente recomendable la elaboración de una estrategia precisa de conservación desde el momento de proyecto mismo, logrando de este modo (si la estrategia es buena), una vida más larga del pavimento con un menor coste. En definitiva, haciendo valer el dicho popular de que más vale prevenir que curar.

Desde un punto de vista técnico, el estado del pavimento puede representarse mediante un indicador global (indicador de estado) que puede incluir distintos factores relacionados con el estado de aspectos concretos como son básicamente la regularidad superficial y la capacidad estructural del firme en referencia a la estructura misma, así como también aspectos de conservación más ordinaria (limpieza, etc.).

En la figura 6.1a (Kraemer, 2004) se muestra un esquema usual de un posible gráfico de la evolución del indicador de estado en el tiempo respecto a diferentes estrategias de conservación; mientras que la figura 6.1b muestra un caso real (carretera C-

16, pk. 93+980 y 97+187 para un tráfico T2) de la política seguida por la dirección general de carreteras de la Generalitat de Catalunya (Follía, 2010).

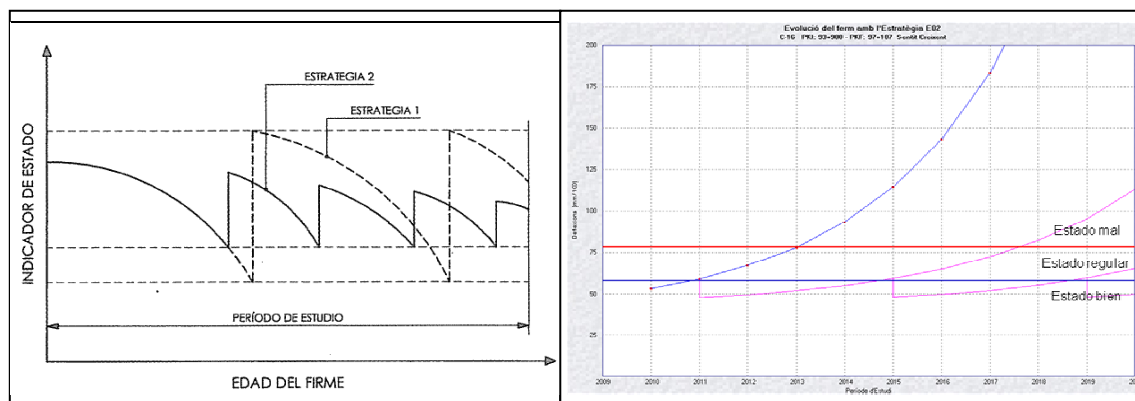


Figura 6.1.- Diferentes estrategias de conservación de un firme: a) esquema usual (Kraemer, 2004) y b) esquema específico (Follía, 2010)

En la citada figura 6.1, puede verse que debe definirse un umbral mínimo de estado, el cual puede ser diferente en función de las circunstancias específicas del organismo responsable de la conservación. Al mismo tiempo se pueden plantear niveles de actuación que reduzcan o aumenten la frecuencia de las actuaciones, tal como se observa en las estrategias 1 y 2 de la figura 6.1a.

Un aspecto a destacar, es que la curva de degradación si es específica del tipo de solución. Por ello, a igualdad de factores, las pendientes de las curvas de degradación correspondientes a este tipo de soluciones, en general para pavimentos de hormigón, son más suaves que otras soluciones, lo que implicaría periodos más largos de actuación. Así para el pavimento flexible de la figura 6.2b, se plantea la necesidad de actuación cada 4 años en la curva superior, siendo mayor para otras situaciones y Administraciones, mientras que en el caso de ser de hormigón este período habría sido significativamente mayor.

Hay que insistir en el hecho de que conviene incluir políticas activas de conservación desde proyecto para reducir el riesgo de tener que hacer actuaciones no programadas, incluidas en un paquete genérico de conservación. A manera de ejemplo, en la figura 6.2 puede verse el importe de licitaciones en obras de conservación extraordinaria, correspondiente a la Dirección General de Carreteras de la Generalitat de Cataluña, en los últimos 7 años.

En ella puede verse que la media se sitúa en un entorno de 75 a 80 millones de euros y 60 obras por año, para una red autonómica de 247,1 km de autopistas, 425,6 km de vías preferentes y 5.056,3 km de carreteras convencionales, siendo la distribución de los sistemas de conservación de los mismos: 4.523 km en conservación semi-integral, 614

km en conservación integral, 344 km en peaje por canon, 194 km en peajes explícitos y 54 km en túneles (Follía, 2010).

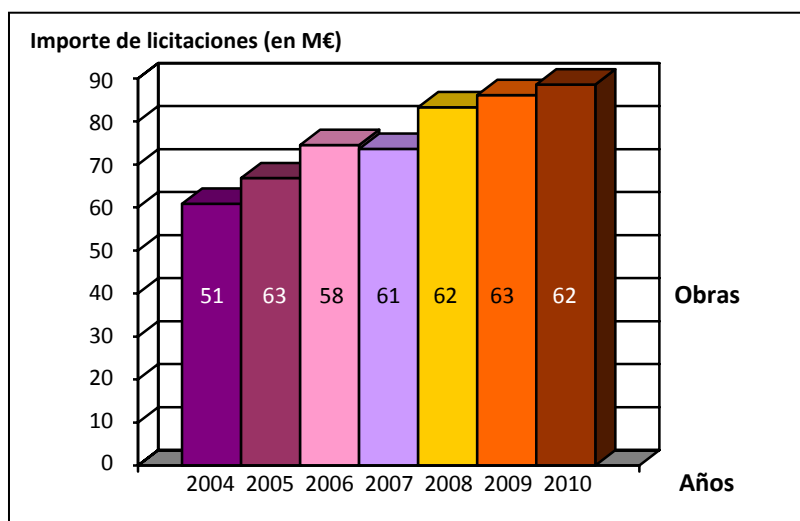


Figura 6.2.- Conservación extraordinaria en carreteras G.C. (Follía, 2010)

### 6.2.3.- Bases de datos

Una base de datos robusta y actualizada es necesaria para el buen funcionamiento de un sistema de gestión de firmes. La fuente de la base de datos es toda la información al respecto del estado del firme obtenida a través de la inspección visual y la auscultación periódica de distintos tramos representativos del pavimento, así como de la información contenida en el propio proyecto constructivo, de los informes del Control de Calidad, y de las diferentes actuaciones llevadas a cabo a lo largo de la vida de la estructura, en definitiva, de la trazabilidad de la obra.

Las informaciones de que debe disponer la base de datos son el inventariado de la red (con datos relativos a la geometría y puntos singulares existentes), datos del tráfico existente, las secciones estructurales de los firmes, los deterioros superficiales que vayan apareciendo con su localización exacta, datos sobre la resistencia al deslizamiento, datos de la apertura de juntas y del deterioro de los sistemas de sellado, localización de nuevas fisuras, datos de posibles accidentes, y datos de los posibles ensayos efectuados (tanto de los deflectómetros como de las probetas, definidos en el Control de Calidad).

Para el caso que nos ocupa, de los pavimentos bicapa de hormigón, dado el carácter pionero de los mismos, no existe este banco de datos, a no ser que se traslade a las experiencias positivas en otros países, por ejemplo Austria. Por ello, no puede hacerse o plantearse un banco en concreto, sino alertar de la importancia que el tema tiene y la necesidad de articular un sistema de este tipo desde las primeras realizaciones con esta técnica, con objeto de poder tener unos criterios fiables de comparación cara al futuro, lo cual debería ser tenido en cuenta en las administraciones que incorporen esta técnica entre las soluciones posibles a sus obras.



#### 6.2.4.- Datos del estado de la carretera

Con respecto a que medir para conocer al estado de la carretera es necesario que las actuaciones vayan desde el comportamiento estructural conjunto al detalle de los acabados, en este caso muy importante lo que respecta a la textura. De acuerdo con Hereu (2010), estas actuaciones se pueden dividir en diversos índices:

- Índice estructural:

Analiza el comportamiento conjunto (interacción suelo firme) y se obtiene mediante la medida de deflexiones. Es recomendable obtenerlo de forma sistemática, tanto en la recepción de la obra (foto del estado cero) como durante la explotación de la obra o ante cualquier proyecto de reparación. En el caso de los firmes de hormigón es preciso tener en cuenta la influencia de los gradientes térmicos y de humedad en los resultados de las medidas. La frecuencia en explotación la asigna la administración responsable de la carretera, pudiéndose plantear políticas con frecuencias variables en función de los resultados anteriores.

- Índice superficial:

Analiza el estado de la superficie del pavimento, el cual puede ser reflejo de ataques externos (por ejemplo, del tráfico, condiciones climáticas, sales fundentes), internos (por ejemplo, reacciones expansivas en el propio hormigón) o de las capas inferiores (por ejemplo, falta de capacidad de soporte de la explanada).

La actuación puede realizarse mediante diferentes métodos (inspección visual, interpretación de imágenes de la superficie de rodadura grabadas con una cámara lineal), si bien la inspección visual es el más básico y al mismo tiempo más barato, permitiendo obtener un grado de fiabilidad elevado (que habrá que complementar con otro tipo de medidas). Para este tipo de pavimentos habrá que fijarse, principalmente, en los siguientes grupos de deterioros superficiales:

- Pérdida de textura (debida a un desgaste paulatino de los materiales de la superficie)
- Pérdida de regularidad superficial (por ejemplo, por escalonamiento de las juntas o por asentamientos de la explanada)
- Deterioro y apertura progresiva de las juntas.
- Deterioro del material de sellado de las juntas.
- Aparición de nuevas fisuras, debidas a retracción, acciones térmicas u otro origen (por ejemplo, juntas con movimiento coartado por falta de paralelismo de los pasadores). Al inspector se le debe preparar para saber diferenciar

fácilmente uno u otro tipo de fisuras, así como los tiempos de aparición asociados.

- Desconchados superficiales (baches).
- Roturas de esquina.

La frecuencia de este tipo de actuación puede responder, por un lado, a la política general de la administración responsable de la carretera (por ejemplo, 2 años en el caso de algunos servicios territoriales de la G.C. según Hereu, 2010).

Por otro lado, si se hace disociado, para el caso de pavimentos bicapa de hormigón, esta frecuencia podría ser variable, por ejemplo, una inspección en la recepción de la obra (estado cero), al cumplirse un año, ya que en ese periodo se habrá producido la mayor parte de la retracción y habrá cubierto un ciclo climático entero. Con posterioridad la frecuencia puede ser de 5 años si no se han observado anomalías en la inspección anterior. Ello responde a que el hormigón es un material que va ganando resistencia con el tiempo.

- Índice de adherencia:

Analiza el estado superficial de la capa de rodadura con objeto de garantizar la adherencia con los neumáticos de los vehículos, tanto longitudinal como transversal, en todas las condiciones, especialmente las más adversas (lluvias, etc.).

En España es usual tomar como parámetro de control de obra la profundidad media de la textura, evaluada mediante el ensayo de círculo de arena (NLT-335) u otros (permeámetro LCS), si bien tienen un escaso rendimiento, por lo que usualmente se sustituye o complementa con otros con medidas llevadas a cabo con equipos laser de mayor rendimiento. En el firme en servicio suele evaluarse el Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT) mediante el equipo SCRIM (Sideway Force Coefficient Routine Investigation Machine) siguiendo la norma NLT-336.

La influencia estacional (diferente a lo largo del año) y climatológica (Martínez y Marcuerquiaga, 2010), hace que el CRT pueda cambiar a lo largo del año, alcanzándose usualmente los valores máximos en invierno y los mínimos en verano, por lo que de cara al seguimiento se precisa tomar medidas de forma sistemática en una determinada época. El criterio lo debe definir cada administración responsable de la carretera.

Asimismo hay que tener en cuenta las diferencias que se pueden encontrar en tramos al aire libre o en túnel, dadas, las diferentes condiciones de la radiación solar directa, que inciden en el valor del CRT.

- Índice de regularidad:

Analiza la regularidad superficial determinando el nivel de confort de la rodadura de los vehículos sobre el firme evitando que deslicen y que no se presenten ni vibraciones ni oscilaciones. En España, para evaluar la regularidad de un pavimento se utiliza, usualmente, el índice internacional de regularidad (IRI).

Para el caso de pavimentos bicapa de hormigón, la frecuencia de medida podría ser variable, por ejemplo, una inspección en la recepción de la obra (estado cero), al cumplirse un año, ya que en ese periodo se habrá producido, por un lado, un ciclo climático entero y, por otro lado, un mínimo desgaste de la microtextura. Con posterioridad la frecuencia puede ser de 5 años si no se han observado anomalías en la inspección anterior. Ello responde a que el IRI en pavimentos de hormigón suele mejorar con el tiempo.

Al tratarse de pavimentos de hormigón, una de las vías de posibles problemas, es la existencia de expansiones internas, por reacciones expansivas de los áridos (por ejemplo, oxidación de compuestos de hierro existentes en los áridos (pirita y/o pirrotina) o bien en su relación con los álcalis del cemento. Este tipo de expansiones da lugar a una fisuración enramada que el inspector debe conocer. En el hipotético caso que se presentase este tipo de expansiones, poco probable en este momento por el nivel de exigencia de las propias normativas respecto a los áridos, hay que recordar que son de efectos diferidos, esto es se presentan a lo largo de los años y no a primeras edades, aunque la relación superficie/volumen es alta y eso reduciría plazos.

#### 6.2.5.- Tratamiento de los resultados

Tras cada una de las campañas de medida realizadas, con las frecuencias previamente establecidas, los resultados deben archivar de manera estandarizada en la base de datos que se disponga, catalogando también los posibles deterioros hallados.

Cabe señalar que los pavimentos bicapa no modifican las políticas que cada Administración tenga en la gestión de sus carreteras, sino que, en todo caso, pueden implicar unos periodos de tiempo mayores entre las distintas campañas, por las razones anteriormente expuestas.

### 6.3.- NIVELES Y ACTUACIONES DE CONSERVACIÓN

En línea con lo anteriormente descrito los pavimentos bicapa de hormigón no representan un hecho diferencial al estándar sobre las diferentes actuaciones que contempla la conservación de firmes según la norma 6.3 IC (Ministerio de Fomento, 2003). En ella, en función del grado de afectación a desarrollar en el vial (nivel de

conservación), estas actuaciones pueden definirse como **ordinarias** y preventivas (Apartado 6.3.1) o **extraordinarias** y curativas (Apartados 6.3.2-4).

Esta distinción hace referencia tanto al grado y nivel de afectación de los posibles deterioros (puntuales o generales, ligeros o graves, etc.) así como al carácter de las tareas de conservación (de enfoque más bien previsor o directamente reparador). Las actuaciones extraordinarias se originan por la aparición de deterioros importantes y mucho más generalizados. En estas actuaciones de carácter extraordinario pueden distinguirse las enfocadas a la *rehabilitación* y a la *reconstrucción* del firme.

Las tareas de rehabilitación, ya sean puntuales o globales, debidas a cambios sustanciales de las características iniciales o a nuevas solicitudes no previstas en el proyecto original, son las que refieren a la renovación y recrecimiento superficial (saneamiento de bacheos, etc.), al fresado, las rehabilitaciones estructurales y la ejecución de refuerzos, el recalce de losas, las posibles actuaciones de mejora del drenaje subterráneo, etc. La reconstrucción del firme, ya sea total o parcial, puede deberse a una causa excepcional no prevista (fenómenos naturales, o incluso accidentes, etc.) pero comúnmente suele originarse por una mala elaboración de la estrategia de conservación o una deficiente gestión de la misma, olvidando las tareas de mantenimiento ordinario y habiéndose generado daños importantes con un alto nivel de deterioro que es imposible o económicamente inviable abordar con una rehabilitación.

También, en función de las particularidades de ciertos tramos del vial, las actuaciones de conservación (ordinarias o no) pueden tener características especiales, obligando a adoptar estrategias distintas a las elaboradas en el resto de la carretera (Apartado 6.3.5).

#### 6.3.1.- Actuaciones ordinarias

Por actuaciones ordinarias se entiende las que se llevan a cabo de manera rutinaria y periódica a lo largo de la vida útil de la estructura, según la estrategia de conservación adoptada, sin implicar un nivel de modificación sustancial de los elementos originales del firme. Estas son todas las tareas referentes a la reparación de desperfectos de carácter más bien puntual y de poca gravedad (reparación y resellado de juntas, sellado de nuevas fisuras, etc.).

En la Tabla 6.1 se presentan las características particulares de las tareas ordinarias de conservación más significativas. En ella se incluye un apartado sobre la corrección de los bordes de las losas, específico de este tipo de pavimentos. Por otro lado, cabe decir que, según la estrategia adoptada, parte de las tareas de rehabilitación estructural (por ejemplo el fresado) pueden incluirse más bien como actuaciones ordinarias o preventivas y no como extraordinarias o curativas.

Actuaciones ordinarias	Características
Sellado de grietas y fisuras superficiales	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Conviene identificarlas y sellarlas lo antes posible para impedir la entrada de agua y suciedad, evitando también la degradación de los bordes y su afectación a la regularidad superficial (posible aparición incluso de baches).</li> <li>• Si son de origen estructural el tratamiento es distinto al considerarse el problema incluido en las actuaciones extraordinarias de rehabilitación.</li> <li>• La ejecución del sellado se efectúa mediante el cajeado de la grieta a fin de formar un surco con las dimensiones adecuadas para aplicar un producto de sellado que obture la apertura y quede adherido a los bordes, adaptándose a los posibles movimientos. Como ya se ha explicado en otros capítulos, hay diferentes y efectivas tipologías de productos de sellado.</li> </ul>
Resellado de juntas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El producto de sellado existente deteriorado deberá eliminarse mediante una limpieza cuidadosa de la junta, antes de aplicar un nuevo producto</li> </ul>
Descarnaduras y baches	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La aparición de descascarillados superficiales puede deberse a defectos de construcción, aunque generalmente se produce por la acción combinada de ciclos hielo-deshielo y por el ataque producido por sales fundentes empleadas en periodo invernal. Este fenómeno se limita a zonas con climatología rigurosa, y a hormigones con insuficiente aire ocluido. En ocasiones puede también producirse este defecto como consecuencia de accidentes de tráfico, pérdida de productos agresivos para el hormigón por parte de camiones de transporte, etc.</li> <li>• Cuando la profundidad de la descarnadura ha rebasado un cierto límite, del orden de 10 mm, es necesario reemplazar el hormigón perdido y/o dañado. La solución más frecuente es el relleno de la zona dañada con un material que permita su utilización en capas delgadas. El tipo de material a emplear depende de la profundidad del tratamiento; hasta 30 mm se emplean morteros y para espesores superiores, hormigones de características similares al de la capa superior del pavimento. Si es preciso abrir rápidamente al tráfico, será necesario el empleo de cementos con un desarrollo rápido de resistencias o de ligantes a base de resinas epoxi.</li> <li>• Si el astillado es profundo y afecta más de <i>un tercio</i> del espesor de la losa, la reparación debe realizarse en todo el espesor de la misma. Deberá abarcar toda la zona deteriorada, ampliándola si es preciso a la vista de lo que se encuentre al demoler; de lo</li> </ul>

	<p>contrario, las zonas contiguas no rehabilitadas y que tuvieran defectos no detectados se convertirán en los primeros fallos del firme rehabilitado.</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Estas reparaciones de espesor completo deben conectarse con las losas circundantes mediante pasadores en todo su perímetro.</li> </ul>
Astillados de los labios de las juntas	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El astillado de los labios de las juntas se debe normalmente a defectos de construcción tales como falta de compactación, averías producidas durante la retirada de encofrados, colocación defectuosa del inductor de grieta, o bien a la intrusión de elementos duros en la junta. Si el defecto es más grave y alcanza más allá de los bordes de la junta, la causa puede ser el acodalamiento de pasadores por estar mal doblados o alineados, por tener sus extremos con rebabas o por carecer de inhibidor de adherencia, así como un posible retraso en el corte de la junta.</li> <li>• Conviene reparar con cierta urgencia estos desperfectos superficiales, antes de que el astillado progrese más allá de 20 mm de profundidad. El método de reparación es similar al empleado para las descarnaduras, si bien no conviene aserrar el perímetro a fin de mejorar la adherencia con la zona no dañada.</li> <li>• Si el astillado es profundo y afecta más allá del tercio del espesor de la losa, la reparación debe realizarse en todo el espesor de la misma.</li> </ul>
Reparaciones a espesor completo	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Si los baches son profundos y afectan a más de un tercio del espesor de la losa, o bien si una zona del pavimento presenta una fisuración múltiple no debida a fallos de las capas inferiores del firme o de la explanada, la reparación debe realizarse en todo el espesor de la misma. Deberá abarcar toda la zona deteriorada, ampliándola si es preciso a la vista de lo que se encuentre al demoler; de lo contrario, las zonas contiguas no rehabilitadas y que tuvieran defectos no detectados se convertirán en los primeros fallos del firme rehabilitado.</li> </ul>

*Tabla 6.1.- Características de las actuaciones ordinarias de conservación*

Desde el punto de vista de procedimientos de actuación, los pasos a seguir en el caso de un bacheo son los siguientes:

- Marcado y corte de los bordes del bache, dando una forma rectangular que lo englobe sobradamente. Las paredes del corte deben quedar verticales y el fondo plano.



- Limpieza del fondo mediante un barrido enérgico y de las paredes del bache con aire a presión para eliminar los materiales sueltos. Es conveniente generar una cierta rugosidad en el hormigón de la capa de base visible en el fondo.
- Aplicación de un puente de unión (por ejemplo, una capa fina de lechada de cemento) justo antes del relleno del bache, que garantice una correcta adherencia con el hormigón existente.
- Relleno del bache con el nuevo hormigón de la capa de rodadura. Hay que tener presente que si se quiere alcanzar la misma textura inicial (Figura 6.3a), debe irse a una mezcla seca y, consecuentemente, no trabajar con un hormigón autocompactante ya que al disponer de mayor cantidad de finos, la textura superficial sería diferente, tal como se puede ver en la figura 6.3b, correspondiente a una prueba de contraste en el tramo experimental explicado en el capítulo 8.



Figura 6.3.- Textura capa rodadura: a) inicial o de proyecto y b) prueba en HAC

- Alisado de la superficie, nivelándola respecto al pavimento existente contiguo, y aplicación del retardador de fraguado. Los pasos posteriores del denudado de la superficie, aplicación del producto de curado final y posterior puesta en servicio son los mismos que los de la construcción de un pavimento nuevo descrita en el capítulo 3.

mientras que los pasos a seguir en las reparaciones a espesor completo son los siguientes:

- Marcado y corte de los bordes del bache, dando una forma rectangular. Las paredes del corte deben quedar verticales y el fondo plano.
- Instalación de pasadores en las juntas transversales de la zona a hormigonar y de barras de unión en las juntas longitudinales

- Limpieza del fondo y de las paredes de la zona demolida para eliminar partículas sueltas.
- Puesta en obra de los hormigones de la capa de base y de la capa de rodadura.
- Alisado de la superficie de forma análoga a como se ha descrito en el caso de bacheo.

### 6.3.2.- Renovaciones superficiales

El objetivo de la renovación superficial es otorgarle al firme unas características superficiales (**textura** y **regularidad superficial**) cumpliendo con las exigencias de las normativas. En general, la mejora de la regularidad superficial (cuantificada a través del IRI) se lleva a cabo mediante técnicas de eliminación parcial del material, recrecimiento (adición de material; ver Apartado 6.3.3), o incluso una combinación de ambas.

Para la eliminación parcial del material puede recurrirse a un cepillado con discos de diamante o a un fresado con tambores provistos de picas (con intensidad variable en función de la importancia de las irregularidades a corregir). Si solamente se pretende mejorar las características antideslizantes, pueden emplearse también técnicas de granallado, proyectando sobre el pavimento esferas o prismas de acero.

Tanto la regularidad superficial como las características antideslizantes pueden mejorarse también mediante la extensión de una nueva capa de rodadura de mezcla bituminosa o de hormigón, cuyo espesor dependerá de la magnitud de los defectos a corregir. Si solamente se trata de mejorar el coeficiente de rozamiento puede recurrirse a aplicar tratamientos superficiales. En cualquier caso es imprescindible asegurar una adherencia adecuada entre el pavimento existente y las nuevas capas.

Los problemas de regularidad superficial tienen más probabilidad de aparecer en las proximidades de las juntas de construcción que deben disponerse en las paradas, programadas (fin de la jornada diaria) o no, del proceso de hormigonado. En el caso de las juntas de final de día, suele ser preciso acabar los últimos metros del pavimento de forma manual; mientras que en las primeras puestas tras iniciar de nuevo el hormigonado es frecuente tener que realizar algunos ajustes en la composición del hormigón, siendo preferible rechazar algunas amasadas defectuosas que tener que realizar a posteriori correcciones en el hormigón endurecido.

### 6.3.3.- Rehabilitaciones estructurales

Las actuaciones entendidas como rehabilitaciones estructurales son las correspondientes, de modo general, a la ejecución de **refuerzos** (recrecimiento) y al **recalce de losas**. Dan respuesta a un deterioro importante que ha hecho disminuir sustancialmente la capacidad estructural del firme.

En el apartado anterior se ha indicado que para la renovación de las características superficiales puede recurrirse a la aplicación de una nueva capa de rodadura, o incluso simplemente a la de un tratamiento superficial si no se busca una mejora de la regularidad superficial.

La extensión de un refuerzo para aumentar la capacidad de soporte de un pavimento existente puede ser debida a que el pavimento presente de forma generalizada defectos estructurales importantes (por ejemplo, más de un 20 % de losas con fisuración múltiple) o bien a que en dicho pavimento, aún encontrándose en buen estado, se prevea un aumento importante del tráfico.

Cuando el pavimento existente presenta problemas importantes, el refuerzo del mismo mediante la extensión de un nuevo pavimento bicapa de hormigón debe ejecutarse de forma no adherente, es decir, interponiendo una capa de separación entre el pavimento nuevo y el antiguo que impida que se reflejen las fisuras y otros posibles desperfectos de este último en el refuerzo. La experiencia ha mostrado que las mezclas bituminosas son las que proporcionan los mejores resultados como material de separación, siendo suficiente, en general, un espesor de 4 cm

Si el pavimento existente se encuentra en buenas condiciones puede recurrirse también a la extensión de un refuerzo adherido de menor espesor que uno no adherido, aunque en este caso hay que adoptar una serie de medidas (eventual fresado del pavimento existente, limpieza del mismo, aplicación de una lechada de cemento inmediatamente antes de la extensión del refuerzo, etc) que garanticen una unión correcta entre el pavimento existente y el refuerzo.

Si las capas de apoyo del pavimento presentan huecos, debidos por ejemplo a fenómenos de erosión provocados por el agua infiltrada por las juntas, puede ser conveniente hacer un recalce del pavimento mediante inyecciones de lechada que rellenen dichos huecos.

#### **6.3.4.- Otras actuaciones de rehabilitación estructural**

Si los deterioros del firme son debidos a unas características inadecuadas de alguno de los materiales de la explanada, se precisa una demolición hasta superar el material en cuestión y una eliminación de los elementos resultantes. Posteriormente se repondrán las capas excavadas y el firme, asegurando un buen drenaje de las zonas más afectadas.

Por último, respecto a la posibilidad de reciclar las losas que se sustituyen, si bien técnicamente es posible, al nivel del estado actual de la técnica, no parece probable que ese reciclado pueda llevarse a cabo in situ, sino que más bien los elementos procedentes de la demolición del pavimento serán transportados a una planta de machaqueo fija o móvil para su posterior reutilización.

## CAPÍTULO 7

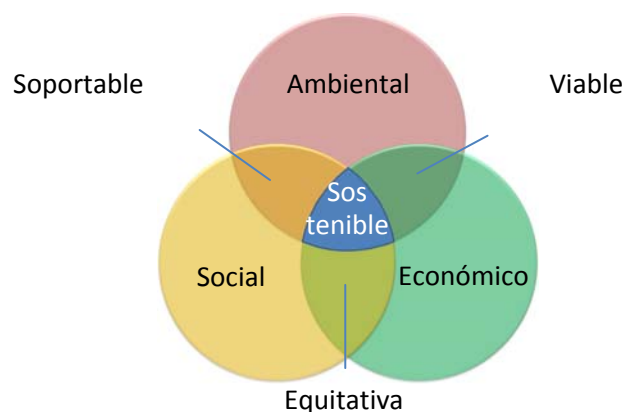
# ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD

### 7.1.- INTRODUCCIÓN

Las primeras ideas relativas a la sostenibilidad toman fuerza durante la década de 70 bajo una visión predominantemente medioambiental que considera que las especies y ecosistemas deberían usarse y manejarse de forma a poder auto-renovarse indefinidamente (IUCN, 1980). Esa idea se amplía en la década siguiente trascendiendo al ámbito económico y social. Entonces surge la primera definición ampliamente aceptada de sostenibilidad, la cual se deriva del término “desarrollo sostenible” formalizado por la Comisión Mundial de Medio Ambiente y Desarrollo de Naciones Unidas en el Informe Brundtland (1987) como:

*“el desarrollo que atiende las necesidades de las generaciones presentes sin comprometer las posibilidades de las del futuro para atender sus propias necesidades.”*

En base a ello se abstrae que para alcanzar la sostenibilidad es necesario optimizar la utilización de los recursos en cualquier decisión o actividad, evitando su uso superfluo o injustificado (WCED, 1987). Tal y como muestra la figura 7.1, esa búsqueda debe contemplar de forma equilibrada los tres ámbitos fundamentales de la sostenibilidad: el económico, el social y el medioambiental. (Adam, 2006; UN, 2005), se una forma soportable, viable y equitativa.



*Figura 7.1.- Ámbitos de la sostenibilidad*

Dada la creciente relevancia del tema, es cada vez más frecuente el uso del análisis de sostenibilidad en diversos sectores. En ese contexto, se plantea la necesidad de evaluar la sostenibilidad de los pavimentos bicapa de hormigón. Sin embargo, como en la literatura no se ha encontrado datos suficientes sobre la sostenibilidad de estos últimos, se realiza una extrapolación de lo considerado para los pavimentos rígidos en general, los cuales se comparan con los pavimentos flexibles.

El presente capítulo tiene como **objetivo** realizar dicha comparación tanto en el ámbito económico como en el social y ambiental. Para ello se han utilizado los resultados de diversos estudios llevados a cabo a nivel internacional dado que no se ha encontrado información suficiente a nivel español. Asimismo se describe a manera de ejemplo la herramienta de toma de decisiones MIVES (Modelo Integrado de Valor para Evaluaciones Sostenibles) que permite el análisis integrado de la sostenibilidad de varias alternativas en un único modelo de evaluación.

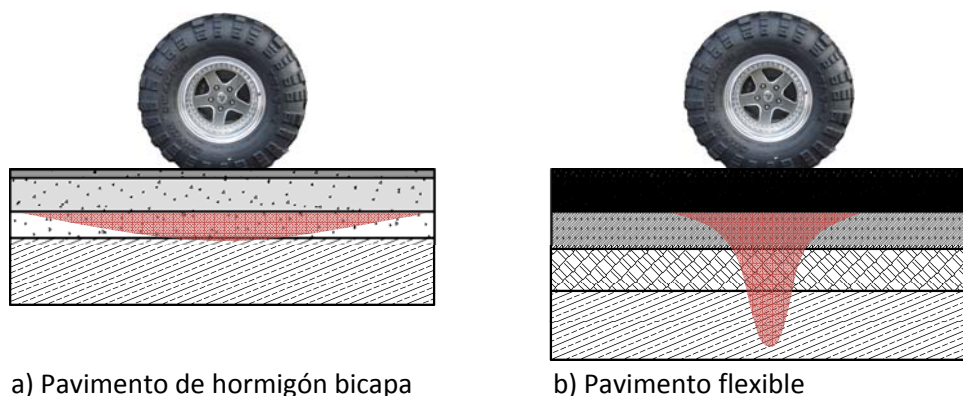
## 7.2.- ASPECTOS ECONÓMICOS

### 7.2.1.- Eficiencia estructural

Existe una diferencia significativa en la forma como los distintos tipos de pavimentos transmiten la carga del tráfico a las capas inferiores de sub base y explanada. Al contrario de lo observado en los firmes flexibles, la mayor rigidez de los pavimentos bicapa de hormigón permite una distribución más uniforme de las cargas, las cuales pasan a afectar menos el comportamiento de la estructura (figura 7.2). A consecuencia de eso, se reduce la necesidad de emplear bases o sub bases con materiales muy rígidos o estabilizar la explanada, lo que también se refleja en capas inferiores más delgadas y económicas. (Tighe, 2001)

Además, las capas de sub base y la explanada pueden presentar variaciones de sus propiedades mecánicas en función de las condiciones ambientales impuestas durante las

diferentes estaciones del año. Ello lleva a una limitación estacional de la capacidad de carga máxima permitida en las carreteras. Como ejemplo, se cita el caso de las bases granulares usadas en Canadá que presentan una reducción de su capacidad portante durante las épocas más frías de la primavera.



a) Pavimento de hormigón bicapa

b) Pavimento flexible

*Figura 7.2.- Zona afectada por una cierta carga*

La diferencia en la manera como los pavimentos transmiten las tensiones a las capas inferiores juega un papel fundamental en dicha limitación. En ese caso, la distribución más uniforme de cargas en los pavimentos rígidos permite una relajación en las limitaciones estacionales de tráfico impuestas. Ello queda evidente en un estudio realizado por AASHO que constató que, en condiciones ambientales primaverales, el 61% de los pavimentos de asfalto ensayados presentarían algún tipo de fallo, mientras que, en los pavimentos rígidos, ese índice fue de tan solo un 5,5%. (ACPA, 1998)

### 7.2.2.- Evaluación de los costes

Diversos trabajos sugieren que, a pesar de tener un mayor espesor, los pavimentos flexibles presentarían menores costes de construcción que los obtenidos para los pavimentos de hormigón. Ello aparentemente se atribuye a los costes más bajos de materia-prima y a la mayor experiencia existente en el caso de los pavimentos flexibles. De acuerdo con la estimación realizada por FHWA (2009) sobre el coste de construcción de 3 pavimentos flexibles y 2 pavimentos rígidos, estos últimos son entre 20% y 82% más caros que los primeros.

Con respecto a los costes de mantenimiento, el Ohio Department of Transportation (ODOT) ha llevado a cabo un amplio estudio con base en los datos obtenidos entre los años de 1960 y 1995 en 4 autopistas compuestas por tramos de pavimento flexible y rígido. Los resultados obtenidos indican que el coste de mantenimiento al final del período es entre 28% y 281% más elevado en los pavimentos de hormigón. Esa información, aunque está bien documentada, no coincide con resultados obtenidos por Jasienski (2007) que estimó que el coste de mantenimiento de los pavimentos de hormigón (0,202 millones de euros/km) es un 59,6% menor que el de pavimentos flexibles (0,500 millones de euros/km).



Las estimaciones realizadas por FHWA (2009) también consideran que los costes de mantenimiento de los pavimentos de hormigón son más bajos. Por consiguiente, la diferencia inicialmente apreciada en el coste de construcción (entre 20% y 82%) se reduce al estimar el coste total final para un período de 30 años, mostrado en la tabla 7.1. En ella se aprecia que el coste total final del pavimento rígido es, en el mejor de los casos, un 11,1% más bajo y, en el peor de los casos, tan solo un 3,86% más elevado.

Tasa de descuento	Coste presente neto (\$/km de carril)			
	Flexible			Rígido <sup>4</sup>
	A <sup>1</sup>	B <sup>2</sup>	C <sup>3</sup>	
4%	325.513	279.248	288.359	290.019
7%	327.874	286.196	295.911	291.249

- 1: Compuesto por 5,08 cm de revestimiento asfáltico, 27,94 cm de base estabilizada con asfalto y 15,24 cm de base flexible, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en el año 16.
- 2: Compuesto por 24,13 cm de revestimiento asfáltico, 15,24 cm de base flexible y 20,32 cm de subbase caliza tratada, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en los años 9 y 20.
- 3: Compuesto por 24,13 cm de revestimiento asfáltico, 10,16 cm de base flexible y 20,32 cm de subbase caliza tratada, teniendo en cuenta la realización de un revestimiento superficial adicional en los años 9 y 20.
- 4: Compuesto por 30,48 cm pavimento de hormigón, 2,54 cm de capa asfáltica, 15,24 cm de base tratada con cemento y 20,32 cm de subbase caliza tratada.

Tabla 7.1.- Coste neto teniendo en cuenta operación de mantenimiento (FHWA, 2009)

### 7.2.3.- Reflectancia

Los pavimentos de hormigón reflejan entre 75% y 700% más luz que los pavimentos flexibles. En virtud de la menor cantidad de luz solar absorbida, los primeros presentan temperaturas considerablemente más bajas cuando expuestos a las mismas condiciones de contorno (se estima una diferencia entre 5,4 °C y 12,6 °C). (Pomerantz, 2000b; Solaimanian, 1993) Al tener menor temperatura, los pavimentos de hormigón calientan menos el aire en la superficies (Pomerantz, 2000b), lo que puede ser especialmente significativo en las ciudades puesto que las mismas presentan un área cubierta por vías que en muchos casos supera los 40%. (Akbari, 2007)

La figura 7.3 muestra la radiación en forma de calor emitida a la atmosfera por diferentes superficies. En ella queda evidente que, en particular durante las horas más calientes del día, el pavimento de hormigón emite una cantidad de radiación en forma de calor considerablemente más baja que los pavimentos de asfalto. (Aseada, 1993 y 1995)



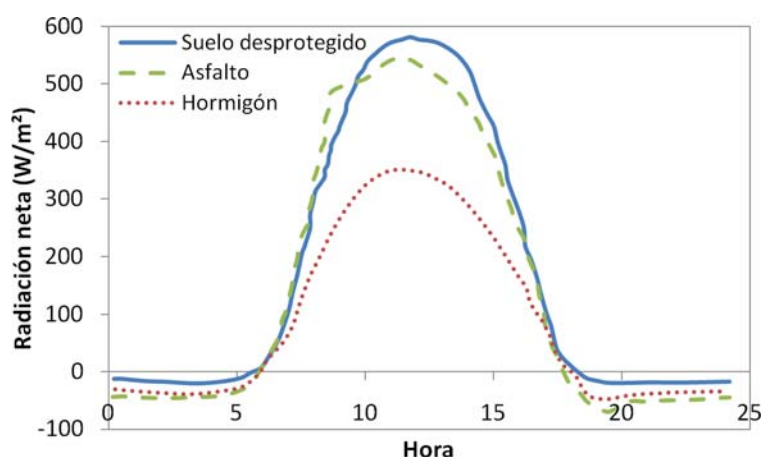


Figura 7.3.- Radiación emitida a la atmósfera por hormigón, asfalto y suelo desprotegido (Asaeda, 1993)

El efecto de esa radiación sobre la temperatura del ambiente fue estimada por Kubo (2006), que analizó la relación entre la variación de temperatura del pavimento y de la temperatura del aire. Los resultados obtenidos en simulaciones numéricas para puntos ubicados a una distancia vertical de 0,5 m y 1,5 m de la acera se muestran en la figura 7.4. En ella puede apreciarse que la reducción de temperatura en la superficie del pavimento al pasar de un firme flexible a un rígido (entre 5,4 °C y 12,6 °C), lleva a una reducción entre 0,6 °C y 0,8 °C, para el punto ubicado a 1,5 m, y entre 0,65 °C y 2,4 °C, para el punto ubicado a 0,5 m.

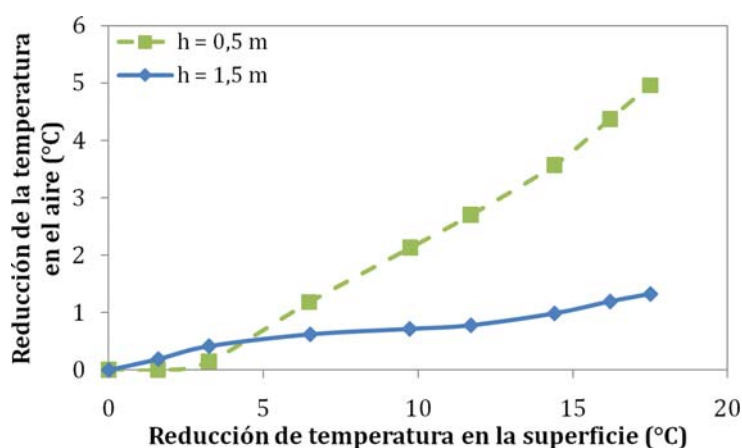


Figura 7.4.- Relación entre reducción en la temperatura del pavimento y del aire (Kubo, 2006)

Estos valores son algo superiores a los obtenidos por Pomerantz (1997) en base a simulaciones meteorológicas realizadas para la ciudad de Los Angeles (Taha, 1999). Los resultados de ese trabajo muestran que la sustitución de un material con reflectancia similar a la de un pavimento flexible por otro con reflectancia análoga a la de un pavimento rígido supone una reducción de 0,6 °C en la temperatura máxima del aire.

En ese contexto se supone que las menores temperaturas ambientales propiciadas por los pavimentos más claros contribuye para reducir el uso de aire acondicionado y, por consiguiente, el consumo de energía. (Pomerantz, 1998). Con ello se reducen las emisiones de CO<sub>2</sub> y la velocidad de conversión de óxidos nítricos y gases orgánicos en nieblas tóxicas en la atmosfera. (Rosenfeld, 1998)

Por otra parte, estudios realizados por Pomerantz (1997 y 2000a) sugieren que las temperaturas más elevadas de los firmes flexibles son perjudiciales al propio pavimento al afectar las propiedades de los materiales bituminosos usados. A ese respecto, se ha verificado una reducción de la rigidez (Yang, 1972; Croney, 1998) y de la viscosidad (Hunter, 1994) del pavimento con el aumento de la temperatura. Asimismo las mayores temperaturas producen un deterioro más temprano y la reducción de la vida útil del pavimento flexible, lo que también lleva a mayores gastos en mantenimiento. (Pomerantz, 2000c). En cambio, a lo largo de la vida útil de los pavimentos bicapa, las propiedades del hormigón empleado prácticamente no están afectadas por el rango de temperaturas observado.

La mayor capacidad de los pavimentos bicapa de reflejar la luz también contribuye para la eficiencia del alumbrado así como para la visibilidad de señales de tráfico y la seguridad de conductores y peatones durante la noche. En consecuencia se podrían reducir los gastos con iluminación (al requerirse lámparas menos potentes) y el consumo de energía para iluminar la vía. Stark (1986) y Pomerantz (2000c) estiman una reducción de aproximadamente 20% en la intensidad luminosa requerida del alumbrado al pasar de un pavimento con reflectancia 0,1 – como es el caso de los firmes flexibles – a otro con reflectancia 0,3 – común en pavimentos rígidos bicapa –. Ello lleva a una reducción estimada en 18,7% en los costes de instalación de la iluminación de la vía y de 19% en el gasto anual de energía.

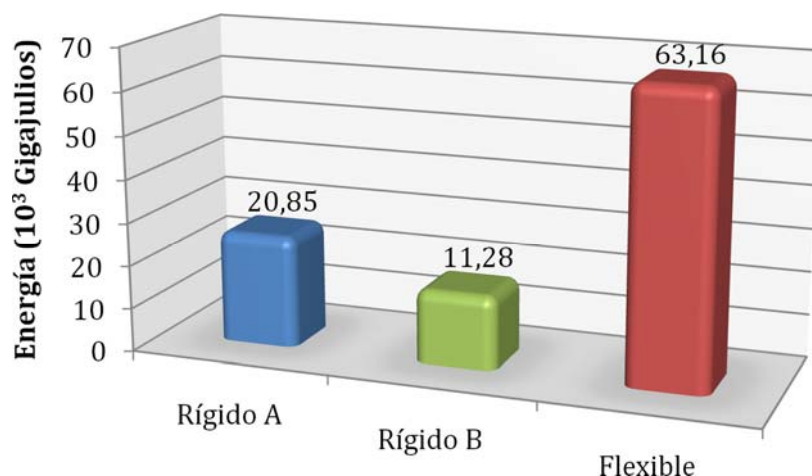
Estos resultados son algo inferiores a los estimados por Gajda (1997), que obtuvo reducciones de hasta un 31% en los gastos totales de instalación, mantenimiento y consumo de energía. Cabe matizar que la luz reflejada por pavimentos de hormigón no suele ser suficiente para ofuscar la visión del conductor. (Pomerantz, 2000c)

### 7.3.- ASPECTOS MEDIOAMBIENTALES

#### 7.3.1.- Energía de construcción y energía embebida

La energía requerida para producir las materias primas, construir, mantener y rehabilitar 1 km de autopistas de 4 carriles conformados con pavimento flexible y rígido durante un período de vida útil de 50 años fue evaluado por el Athena Sustainable Materials Institute (2006). El estudio contempla un tipo de pavimento flexible y dos tipos de pavimento rígidos: la opción A, que presenta capa de rodadura y arcenes en material bituminoso, y la opción B, que se asemeja a los pavimentos bicapa al tener capa de

rodadura y arcenes en hormigón. La figura 7.5 muestra la energía total consumida en las diferentes alternativas por quilómetro de carretera.



*Figura 7.5.- Energía total consumida para construir, mantener y rehabilitar diferentes tipos de pavimento (ASMI, 2006)*

En ella queda evidente que la opción de pavimento rígido tipo A supone un consumo energético 67% menor que el estimado para el pavimento flexible. Sin embargo, la mayor diferencia se observa con respecto al pavimento rígido B (similar al pavimento bicapa) que arroja un consumo de energía 82% menor que el obtenido con el pavimento flexible y 46% menor que el estimado para el pavimento rígido tipo A.

### 7.3.2.- Energía de uso

Estudios realizados por el National Research Council of Canada (Taylor, 2002; Taylor, 2006) muestran que hay una diferencia significativa en el consumo de combustible de camiones en función del tipo de pavimento. Ensayos realizados en condiciones reales para un amplio rango de temperaturas indican que los camiones circulando en pavimentos de hormigón presentan un consumo entre 0,8% y 6,9% (dependiendo del tipo de camión, de la velocidad y de la carga) inferior al medido en pavimentos flexibles. Ese aumento se debe a la mayor deflexión apreciada en los pavimentos flexibles que absorben más energía y generan ligeras restricciones al movimiento. Resultados similares ya habían sido identificados en estudio realizado por Zaniewski et al. (1989) en 12 autopistas teniendo en cuenta una amplia gama de vehículos y velocidades. Si bien en ese caso no se identificaron diferencias significativas en el caso de coches, la reducción de consumo de camiones en pavimentos rígidos llegó a un 20%.

Para estimar la repercusión que la reducción de consumo tendría a nivel español se emplean los datos de tráfico elaborados por Martínez (2008) a partir de Dirección General de Tráfico Anuario 2004, D.G. Carreteras Anuario 2005, Ministerio de Fomento Informe Anual 2005, Agencia Tributaria-Ministerio de Economía 2006. A ellos se aplican las estimativas de emisiones de GEI encontradas en la literatura. Por simplificación, se

considera en los cálculos que la red española de carreteras se compone en su totalidad de pavimentos flexibles. Asimismo se considera un ahorro de consumo de combustible del 0,8% para las furgonetas y del 3,8% para autobuses y camiones, los cuales están dentro del rango obtenido por Taylor (2006). En la tabla 7.2 se aprecia que la reducción total de consumo de combustible asciende a 412 millones de litros, lo que equivale a una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub> del orden de un millón de toneladas.

		Furgonetas		Autobuses	Camiones	Total
		Gasolina	Diesel	Diesel	Diesel	
Tráfico (10 <sup>6</sup> km)	Urbano	1.138	3.232	128	1.272	<b>5.770</b>
	Interurbano	6.979	14.831	1.424	30.482	<b>53.716</b>
Consumo (10 <sup>6</sup> l)	Urbano	235	588	55	578	<b>1.456</b>
	Interurbano	942	1.763	400	9.054	<b>12.159</b>
	Total	1.177	2.351	455	9.632	<b>13.615</b>
Ahorro de combustible (10 <sup>6</sup> l)		9	19	17	366	<b>412</b>
Reducción de emisiones (t)	CO <sub>2</sub>	20.056	50.217	46.164	977.263	<b>1.093.700</b>
	NO <sub>x</sub>	282	562	517	10.944	<b>12.305</b>
	SO <sub>x</sub>	35	71	65	13.79	<b>1.551</b>

*Tabla 7.2.- Ahorro de combustible y emisiones en el contexto español*

También hay que tener en cuenta que los pavimentos de hormigón consumen una cantidad considerablemente inferior de combustible desde el punto de vista de la construcción de carreteras (mayoritariamente diesel). De acuerdo con informes del FHWA (1980), el uso de combustible es igual a 27,4 l por m<sup>3</sup> de pavimentos asfálticos, un valor 5,6 veces mayor que el estimado para los pavimentos de hormigón (4,9 l/m<sup>3</sup>).

### 7.3.3.- Durabilidad

Un pavimento de hormigón, proyectado y ejecutado correctamente, tiene una durabilidad muy elevada, requiriendo generalmente solo una periódica reposición de la selladura de las juntas. De hecho, existen diversos pavimentos de hormigón en servicio por más de 40 ó 50 años, bajo volúmenes de tráfico pesado incluso mayores que los previstos en proyecto. La elevada durabilidad de esos pavimentos se ha verificado de manera similar en varios países para diferentes tráficos y circunstancias climáticas.

En Europa, uno de los ejemplos más notables es la autopista Bruselas – Lieja, abierta al tráfico en 1971/1972 y todavía en servicio con un tráfico de más de 20.000 camiones diarios. En Estados Unidos, la autopista interestatal I-20 construida en 1946 en el valle de San Bernardino en California presenta varios tramos todavía en servicio con una IMD superior a 250000 vehículos diarios y sin haber requerido ninguna rehabilitación estructural.

En España también hay ejemplos notables que atestiguan la durabilidad de los pavimentos de hormigón en las tres técnicas principales de construcción. La autopista Sevilla – Cádiz, construida como un pavimento en masa con juntas sin pasadores, tiene algunos tramos que llevan en servicio desde enero de 1972. Por otro lado, la variante de Torrejón de Ardoz, construida como un pavimento en masa con juntas y con pasadores, estuvo abierta al tráfico entre 1968 y 1998 prácticamente sin necesitar mantenimiento. Finalmente, la autopista Oviedo – Gijón – Avilés (un pavimentos continuos de hormigón armado) se mantiene en funcionamiento desde febrero de 1976.

La mayor durabilidad de los pavimentos de hormigón se atribuye, en gran medida, al aumento de la resistencia de ese material a lo largo de los años. De hecho, la resistencia medida en testigos extraídos al cabo de varios años suelen ser muy superiores a la establecida en la fase de proyecto. En ese caso, el fallo del pavimento suele producirse por la fatiga a flexión que da lugar al agrietamiento generalizado del mismo. Algunos de los factores que influyen en ese fenómeno son el clima, la resistencia del hormigón, el espesor de la losa, la intensidad y el número de aplicaciones de las cargas, la forma y las dimensiones de las losas y las condiciones de su base de apoyo.

En contraste, la durabilidad de los pavimentos flexibles (en especial de las capas de rodadura) depende del fenómeno de envejecimiento de las mezclas bituminosas, el cual se manifiesta mediante la aparición de microfisuras, las pérdidas de mortero, las migraciones del ligante y el desplazamiento del ligante de la superficie del árido grueso. A consecuencia de eso suelen aparecer deterioros como, por ejemplo, baches y peladuras. La solución de esos problemas pasa, generalmente, por la construcción de nueva capa de rodadura que muchas veces debe ir combinada con un refuerzo estructural.

El fenómeno del envejecimiento de las mezclas bituminosas presenta causas muy diversas que desencadenan procesos físicos y químicos complejos. Esos procesos, son afectado por varios factores externos como: la radiación solar, la acción oxidante del aire y del agua, la helada y las sales fundentes empleadas contra ella, el derrame de aceites y de combustibles, la contaminación producida por el desgaste de los neumáticos, el polvo y los vertidos agrícolas. A pesar de ello, la duración de una capa de rodadura correctamente proyectada y construida debería ser de 7 años o más. No obstante, una formulación inadecuada de la mezcla bituminosa puede acortar sustancialmente esa duración.

En EEUU se ha realizado un amplio estudio para determinar el tiempo desde la construcción del pavimento hasta su primera rehabilitación y la vida útil de ésta. Para ello, se ha considerado la información obtenida en 20 Estados teniendo en cuenta carreteras construidas con pavimentos rígido y flexible. Los resultados obtenidos se muestran de manera resumida en la tabla 7.3, en la cual también se estima la vida útil total de ambos pavimentos. (Rangaraju, 2008)

Estado	1ª Rehabilitación		Vida útil de la 1ª Rehabilitación		Vida útil total*	
	Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos	Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos	Pavimentos flexibles	Pavimentos rígidos
Alabama	12	20	8	8	20	28
California	18-20	20-40	10	>10	28-30	30-50
Colorado	10	22	10	18	20	40
Georgia	10	20-25	10	20	20	40-45
Illinois	-	20	-	20	-	40
Indiana	25	30	15	12	40	42
Kansas	10	20	10	7-10	20	27-30
Maryland	15	20	12	-	27	-
Michigan	26	26	10-15	20-21	36-41	46-47
Minnesota	6-7	17	-	10-15	-	27-32
Massachusetts	12	16	9	16	21	32
Missouri	20	25	12-13	20	32-33	45
Montana	19	20	12	20	31	40
Nebraska	15-20	35	12-15	15	27-35	50
North Carolina	12-15	15	12	10	24-27	35
South Carolina	12-15	20	10-15	10	22-30	30
Utah	12-15	10-20	7-8	-	19-23	-
Vermont	-	20	10-12	10-15	-	30-35
Washington	10-17	20-30	10-17	15-20	20-34	35-50
Wisconsin	18-23	25-31	12	8-15	30-35	33-46
Ontario	19-21	18	10-13	10	29-34	28
Promedio	15,6	22,1	11,3	14,3	26,9	36,4

\*Nota: para el cálculo de la vida útil total se considera que el pavimento sólo pasa por una rehabilitación.

Tabla 7.3.- Años hasta la primera rehabilitación y vida útil total

La tabla indica que la 1ª rehabilitación ocurre, en el promedio, 7,5 años más tarde en los pavimentos rígidos, lo que equivale a una durabilidad inicial un 48% mayor. Sin embargo, esa diferencia se reduce al considerar la vida útil de la 1ª rehabilitación, que es tan solo un 27% (3 años) mayor en el pavimento rígido. Desde el punto de vista global se verifica que, en el promedio, la vida útil total de los pavimentos rígidos es un 35% (9,5 años) mayor que la obtenida para los pavimentos flexibles.

## 7.4.- ASPECTOS SOCIALES

### 7.4.1.- Confort y seguridad del usuario

La rugosidad inicial y su variación a lo largo de la vida útil del pavimento es uno de los principales factores relacionados al confort del usuario en la vía. En ese contexto, se considera que un pavimento más rugoso ofrece menos confort al conductor. Un estudio realizado durante cinco años por el Nova Scotia Department of Transportation and Public Works evaluó el confort del usuario en secciones adyacentes de pavimentos rígido y

flexible. En ese caso, el nivel de confort se estimó a través del índice de confort de conducción (ICC), medido desde la construcción de ambos pavimentos. La figura 7.6.a muestra la evolución del ICC, siendo valores más elevados indicativos de un mayor confort del conductor. (NSTPW, 1999)

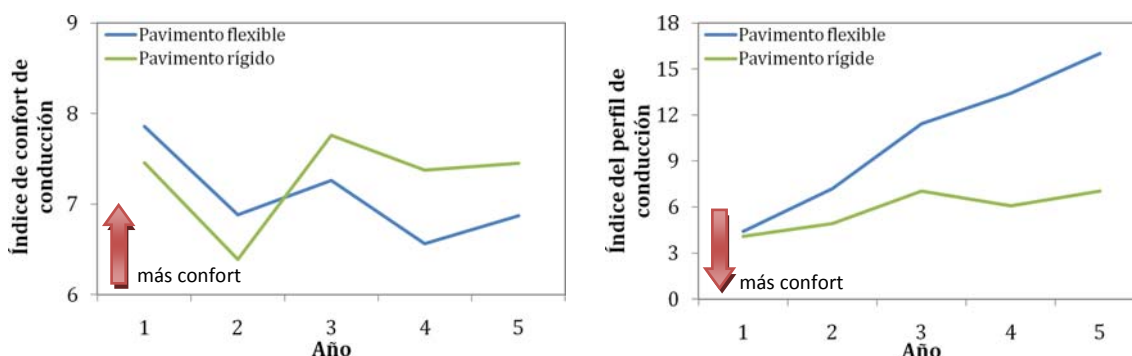


Figura 7.6.- Evolución del: a) índice de confort de conducción y del b) índice de perfil de conducción (NSTPW, 1999)

En la figura se aprecia que inicialmente el pavimento flexible presenta un ICC más elevado. Sin embargo, la degradación natural del pavimento flexible produce una reducción en dicho índice y del confort que, a partir del tercer año, pasa a ser inferior al del pavimento rígido.

Las diferencias entre los pavimentos son más notables al comparar los resultados del índice del perfil de conducción (IPC), que está relacionado con la rugosidad del pavimento medida en un tramo de 100 m. La figura 7.6.b muestra la evolución del IPC medido, siendo valores más elevados indicativos de una mayor rugosidad y un consecuente menor confort del conductor. Tal y como puede apreciarse, ambos pavimentos presentan valores muy próximos de IPC en el primer año. No obstante, en un período de 5 años, el pavimento flexible presenta un incremento de 264% en el IPC mientras que el aumento observado en el pavimento rígido fue de tan solo un 72%. Ello pone de manifiesto la degradación más acelerada del primero, lo que debería reflejarse en una reducción significativa del confort del conductor.

La fricción existente entre la capa de rodadura y los neumáticos es otra característica superficial que afecta principalmente el frenado de los vehículos y, por consiguiente, la seguridad del conductor. De acuerdo con un informe elaborado por el Wisconsin Department of Transportation (WDT, 1996), el rozamiento superficial medido a una velocidad estándar de 40 millas por hora (64,36 km/h) disminuye con la edad del pavimento. A edad 0, los pavimentos de hormigón y de asfalto presentan una fricción superficial equivalente a un coeficiente de rozamiento de 0,55 y 0,40 respectivamente. Al final de la vida útil del pavimento flexible, éste presenta un coeficiente de rozamiento de aproximadamente 0,32, algo inferior a los 0,42 presentados por un pavimento de hormigón con la misma edad.



Los mayores coeficientes de rozamiento de los pavimentos de hormigón se reflejan en una menor distancia de frenado, tal y como se puede apreciar en los resultados mostrados en la tabla 7.4. (Metz, 1990) En ella se verifica que la distancia de frenado medida para el pavimento de hormigón es entre 14% y 40% inferior a la medida para el pavimento flexible.

Condición de la superficie	Distancia de frenado (m)	
	Hormigón	Asfalto
Seca y nivelada	50	58
Húmeda y nivelada	96	109
Húmeda y con surcos	96*	134

*Tabla 7.4.- Distancia de frenado a una velocidad de 96 km/h (Metz, 1990)*

#### 7.4.2.- Contaminación sónica

El tipo de pavimento y su textura superficial influyen en el nivel de contaminación sónica emitida con el paso de vehículos. Existen diversos estudios que concluyen que los pavimentos de hormigón (en particular aquellos con textura transversal) presentan un mayor nivel de ruido que las mezclas bituminosas. A título de ejemplo, en la tabla 7.5 se muestra la intensidad sónica medida en el borde de la carretera teniendo en cuenta diferentes tipos de pavimento en África del Sur (McNerney, 2000).

Pavimento	Intensidad sónica (dBA)
Asfalto de granulometría abierta	79,7
Asfalto de granulometría densa	79,8
Hormigón con juntas	89,0

*Tabla 7.5.- Ruido medido en diferentes tipos de pavimento (McNerney, 2000)*

En ella se observa que los pavimentos de asfalto con granulometría abierta y densa presentaran un nivel de ruido 8,2 dBA más bajo que el apreciado en el pavimento de hormigón con juntas. Experimentos realizados por Polcak (1990) y Van Heystraeten (1990) corroboran estos resultados, indicando una reducción de aproximadamente 7 dB en la contaminación sónica emitido por pavimentos flexibles.

Sin embargo se ha comprobado que, a igualdad de resistencia al deslizamiento, las texturas longitudinales dan lugar a unos niveles sonoros análogos a los de muchas mezclas bituminosas (FHWA, 1996). Por ello, en países donde se han utilizado tradicionalmente

acabados de tipo transversal, como es el caso de Alemania o Estados Unidos, éstos se van abandonando a favor de las texturas longitudinales.

Con el denudado de los pavimentos se pueden obtener niveles sonoros incluso más reducidos. Cuanto menor es el tamaño máximo del árido, más reducido es también el ruido de rodadura (FHWA, 1996). De ahí que en Austria los pavimentos de hormigón se construyan en dos capas, empleándose en la superior, áridos con un tamaño máximo de 8 a 11 mm.

La larga experiencia que se tienen en Austria con el denudado ha permitido constatar que, si bien los niveles sonoros que se obtienen inicialmente con el mismo son superiores a los de las mezclas bituminosas drenantes, el aumento del nivel sonoro que se produce en todos los tipos de superficie con el paso del tiempo hace que, transcurridos 10 años, los pavimentos de hormigón denudado sean los más silenciosos. A pesar de ello, cabe señalar que los pavimentos flexibles siguen llevando cierta ventaja con respecto a la mayoría de las técnicas usadas para dar el acabado superficial del pavimento de hormigón. Ello queda evidente en la figura 7.7, la cual muestra una comparación de la intensidad sónica medida en pavimentos con diferentes texturas superficiales.

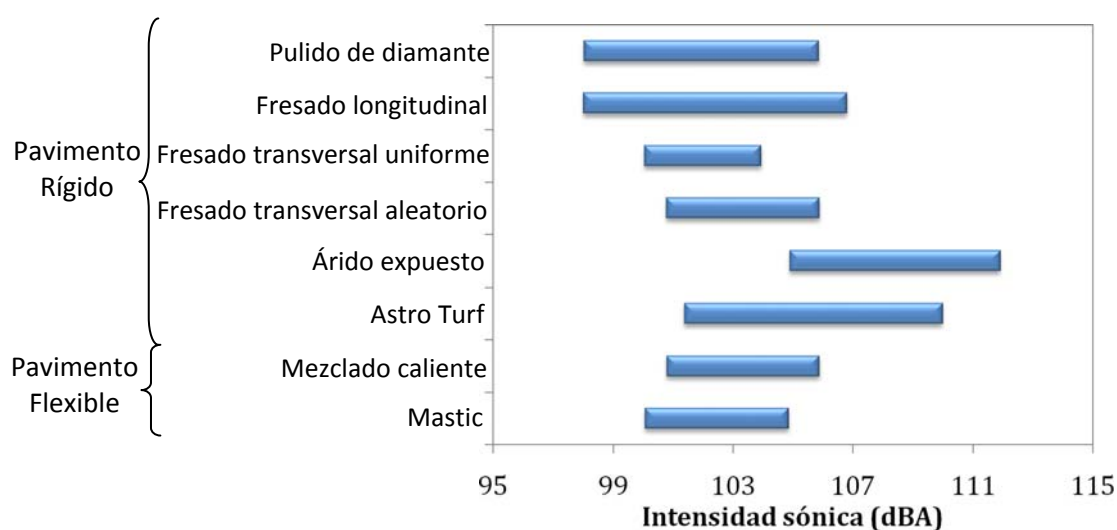


Figura 7.7.- Intensidad sónica en función de la textura superficial (ACPA, 2008)

#### 7.4.3.- Resistencia al fuego

Entre los años 1999 y 2001 han sucedido una serie de incendios catastróficos en túneles de carretera. Estos mostraron la necesidad de una adecuada elección de materiales para la construcción de los pavimentos de los túneles, a fin de aumentar la seguridad del conductor y reducir el tiempo fuera de servicio de la carretera. En ese sentido, el uso de mezclas bituminosas puede suponer un riesgo considerable. El betún presente en las mismas es un material altamente inflamable que entra en combustión a temperaturas del orden de los 400 °C y puede incrementar así la carga de fuego generada por el incendio. Además, el betún en combustión emite sustancias de toxicidad elevada (monóxido y

dióxido de carbono, aldehidos, cetonas, hidrocarburos alifáticos y aromáticos y compuestos de azufre) que pueden acumularse en el ambiente poco ventilado de los túneles.

El hormigón, por su parte, presenta un mejor desempeño frente a incendios al ser un material incombustible que no incrementa la carga de fuego ni desprende gases tóxicos. Además, la baja conductividad térmica del hormigón genera una barrera a la propagación del calor que limita el incremento de temperatura a través del mismo. Consecuentemente, aunque se produce una degradación superficial, las propiedades mecánicas de la estructura a unos pocos centímetros de profundidad se mantienen en niveles aceptables por largos períodos.

El principal inconveniente del hormigón en situaciones de incendio es el desprendimiento explosivo de trozos de la superficie por el aumento de la presión interna de los poros (spalling). Sin embargo, ese fenómeno es más crítico en hormigones de alta resistencia (60 MPa o superiores) que generalmente no se corresponden con los empleados para la construcción de pavimentos.

Teniendo en cuenta los aspectos descritos con anterioridad, en Austria es obligatorio desde 2001 el empleo de pavimentos de hormigón en los túneles de más de 1 km de longitud. Esta medida ha sido adoptada también en España a partir 2006 para los túneles de la Red de Carreteras del Estado (Real Decreto 635/2006). Sin embargo, el Real Decreto 635/2006 permite la adopción de pavimentos bituminosos en casos debidamente justificados, manteniendo niveles de seguridad en el túnel análogos a los que se obtendrían con pavimentos de hormigón. Cabe matizar que, en base al comportamiento verificado en casos reales y en los ensayos de ignición, las mezclas bituminosas pueden alcanzar niveles de desempeño que se acercan a los de un pavimento de hormigón.

## 7.5.- ANÁLISIS DE LA SOSTENIBILIDAD

La evaluación de la viabilidad del proyecto de carreteras debe analizarse globalmente desde el punto de vista de la sostenibilidad en sus tres aspectos básicos: medioambiental, económico y social. Para ello se requiere un sistema integrado de análisis de alternativa capaz de comparar parámetros a veces expresados en diferentes unidades o incluso de difícil cuantificación (Aguado, 2008). Estos diferentes parámetros deben ser homogeneizados en un mismo sistema de valor, permitiendo así la suma del total general de los diferentes aspectos considerados.

Si bien existen numerosas metodologías de toma de decisión multicriterio que atienden las necesidades descritas en el párrafo anterior, en el presente capítulo se describe la metodología MIVES, incluida en el nuevo anejo de sostenibilidad de la Instrucción de Hormigón Española EHE 08. Ésta es una herramienta de decisión multicriterio versátil con un esquema modular muy flexible que permite desarrollar casos

de estudio en cualquier ámbito técnico, científico y social. En ella se evalúan cada una de las alternativas que pueden resolver un problema genérico a través de un único índice de valor, que integra la valoración de todos los aspectos considerados en un árbol de decisión. El modelo multicriterio formaliza matemáticamente el proceso de selección y permite elegir de manera equilibrada y razonable entre varias opciones.

### 7.5.1.- Fases de la metodología MIVES

En la metodología MIVES, inicialmente se estructura y delimita la toma de decisión. Esta estructuración se hace en base a un sistema tridimensional referido a través de tres ejes (requerimientos, componentes y ciclo de vida) que conforman los límites del sistema. Cada espacio tiene diferentes criterios de evaluación modificables en base a las condiciones de los ejes, tal y como puede apreciarse en la figura 7.8. Uno de los ejes comprende los requerimientos que son los aspectos más cualitativos y generales que tienen correspondencia directa con las necesidades del proyecto. En el segundo eje, están los componentes en el que se considera cada uno de los elementos de las diferentes alternativas. Finalmente, el tercer eje corresponde al ciclo de vida, entendiendo por tal las fases temporales de las alternativas.

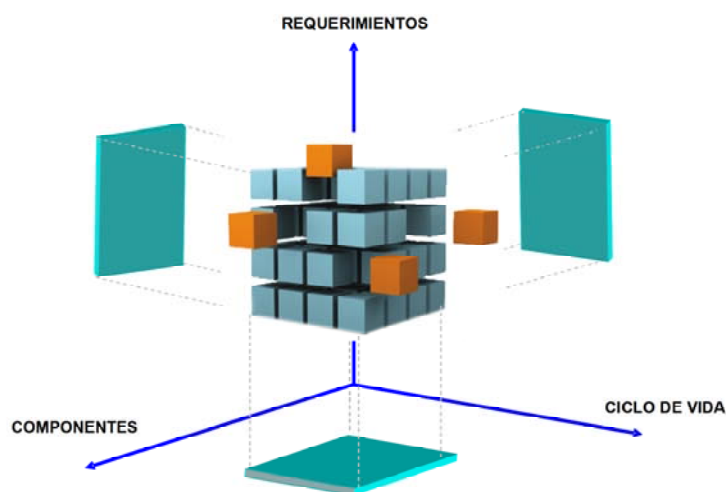


Figura 7.8.- Ejes que componen el análisis según la metodología MIVES (Villegas, 2009)

El cálculo del índice de valor requiere las 5 fases secuenciales descritas a continuación (Viñolas, 2009).

- Delimitación de la decisión, en esta fase se fijan los límites del sistema: el eje temporal, los componentes y los aspectos generales que debería tenerse en cuenta.
- Creación del árbol de toma de decisión, en esta fase se ordena de forma ramificada los aspectos que se tendrán en cuenta en la decisión. En las primeras ramificaciones aparecen los aspectos más generales, los requerimientos; en los siguientes niveles los criterios y sub-criterios y en la última ramificación se sitúan los aspectos más concretos, los indicadores.

- Creación de las funciones de valor, para cada uno de los indicadores que transformará las unidades de medida de cada indicador a una unidad adimensional comprendida entre 0 y 1. Estas funciones de valor, asociadas a cada indicador permiten homogeneizar el problema al traducir el valor en esas unidades adimensionales (Aguado, 2008).
- Asignación de pesos: se asigna la importancia relativa de cada uno de los aspectos en relación a los restantes pertenecientes a una misma ramificación del árbol de la toma de decisión.
- Valoración de las alternativas: se obtiene el índice de valor para cada una de las alternativas planteadas a partir del sumatorio de la valoración y de los pesos de atribuidos a los requerimientos.

### 7.5.2.- Árbol de toma de decisión

Villegas (2009) en su tesis doctoral ha presentado la aplicación del Modelo MIVES al caso de la carretera para valorar cuantitativamente la sostenibilidad de dos alternativas: un pavimento flexible y un pavimento prefabricado de hormigón. El árbol de toma de decisión es sin duda la parte más importante del trabajo de evaluación multicriterio y de su buena elección y construcción depende en gran medida el éxito de los resultados obtenidos.

En la tabla 7.6 se observa el árbol de toma de decisión del caso práctico de valoración de la sostenibilidad de la carretera para las alternativas flexible y prefabricada de hormigón. En este caso en particular, si bien en los requerimientos se incorporan los fundamentales desde el punto de vista de sostenibilidad (económico, social y medioambiental), se ha incorporado asimismo un requerimiento funcional, no estrictamente necesario, si bien en ese caso para considerar la versatilidad de integrar otros servicios.

Por otro lado, tal como puede verse en la tabla, el árbol de toma de decisión presenta 16 indicadores, cada uno de ellos con distintas unidades de medida. En este caso en particular se entiende que la cantidad de indicadores es una cifra aceptable en cuanto a la manejabilidad.

Aumentar mucho el número de indicadores, no aporta precisión, solo aporta mayor trabajo y mayor riesgo en cuanto a la fiabilidad y disolución del peso de los indicadores principales. A partir de las funciones asociadas a cada indicador, se consigue homogeneizar el problema al traducir la cuantificación del indicador a una unidad adimensional comprendida entre 0 y 1 (nivel de satisfacción). Con ello, se logra mezclar la valoración de diferentes indicadores con unidades de medidas distintas para obtener un único índice de valor (Aguado, 2008).

Req.	Criterio	Indicador
Temporal	Tiempo de ejecución	Tiempo de construcción (días/km)
		Tiempo entre cada actuación de mantenimiento (días/km)
	Riesgo de desviación respecto a previsiones iniciales	Incidencia de condiciones climáticas (puntuación)
		Incidencia de condiciones orográficas (puntuación)
		Incidencia de la conflictividad laboral en la subcontratación (puntuación)
Económico	Costes	Coste inicial de construcción (euros/km)
		Coste de mantenimiento (euros/km)
		Coste de implementación del "Sistema Integrado de Servicios" (euros/km)
	Riesgos de desviación del costo respecto al estimado	Desviación del coste por factores externos (%)
Medio Ambiente	Capacidad de introducir materiales reciclados	Material reciclado a utilizar en la estructura (%/km)
	Consumos	Cantidad de energía consumida (Gjoules/km)
		Materias primas utilizadas (t/km)
		Agua utilizada (litros/km)
	Emisiones	Cantidad de CO2 (t/ km)
Funcional	Sistema integrado de servicios	Facilidad de adaptar la estructura en galerías de servicios (puntuación)
		Adaptabilidad de la estructura para colocar elementos prefabricados (puntuación)

*Tabla 7.6.- Árbol de toma de decisión (Villegas, 2009)*





## PARTE B



## CAPÍTULO 8

# PROYECTO DE DEMOSTRACIÓN

### 8.1.- INTRODUCCIÓN

El Proyecto de demostración del firme rígido de hormigón bicapa se ha realizado en el contexto de las obras de **Mejora general, desdoblamiento y acondicionamiento de la carretera C-17** de Cataluña que gestiona la empresa concesionaria CEDINSA, formando parte de la Unión Temporal de Empresas adjudicatarias de esta obra (U.T.E. Vic-Ripoll), la empresa FCC Construcción S.A. Esta empresa ha aportado los datos específicos de la experiencia piloto que se recogen en el presente capítulo (FCC Construcción, 2010).

Con el objeto de lograr una innovación en las técnicas constructivas y en la funcionalidad de los pavimentos, se desarrolló una alternativa a la sección de firme propuesta en el proyecto general que está basada en la Instrucción austriaca de firmes.

La alternativa propuesta es un firme de hormigón vibrado con juntas, ejecutado mediante **sistema bicapa** y con terminación superficial de árido visto. El espesor total de hormigón es de 25 cm sobre una explanada estabilizada con cemento de 30 cm, si bien entre la capa de hormigón y la explanada se disponen 5 cm de mezcla bituminosa en caliente.

Para la materialización de la obra, la empresa austriaca Alpine Mayreder Bau (especializada en la ejecución de pavimentos en el norte y centro de Europa, donde el uso de hormigón en carreteras de alta intensidad está ampliamente difundido) y filial de FCC Construcción desplazó la maquinaria y equipos técnicos y humanos para la ejecución de este proyecto de demostración, la cual se desarrolló en los días 15,16 y 17 de Marzo de 2010.

El lugar designado para la ejecución del proyecto de demostración es un tramo de 912 m de longitud ubicado en la calzada dirección Ripoll del desdoblamiento del eje C-17 entre Masies de Voltregà y el enlace de la vía BV-4655 (puntos kilométricos de explotación: pk 84+154 y pk 85+046), el cual incluye tramos a cielo abierto y en túnel, tal como se muestra en la figura 8.2.

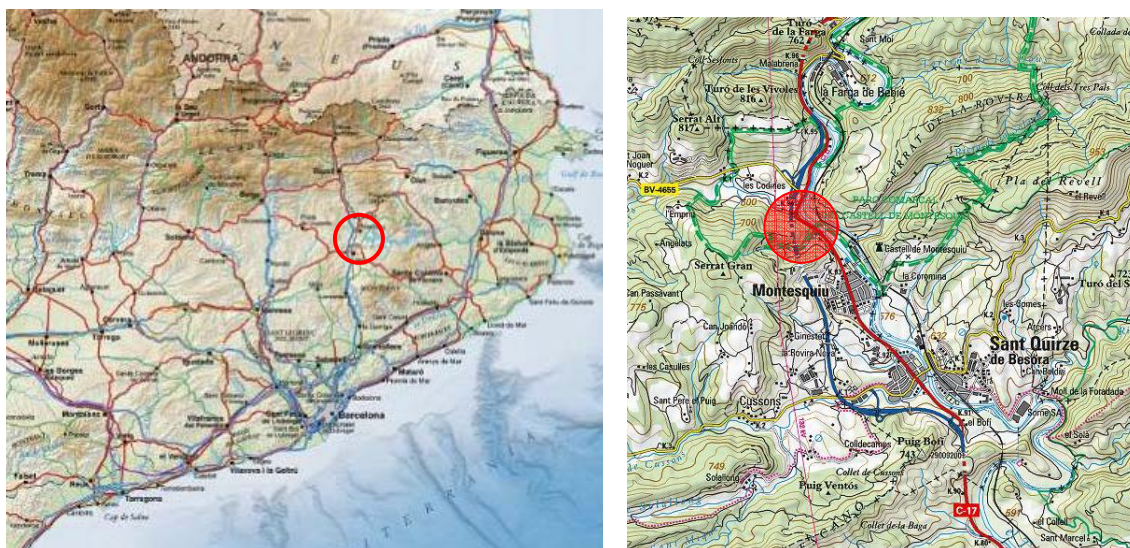


Figura 8.1.- Ubicación del tramo utilizado en la experiencia piloto

La determinación del lugar y la fecha de ejecución de este proyecto de demostración atienden a las siguientes premisas:

- **Disponibilidad de maquinaria y equipos de ejecución.** En el periodo invernal austriaco se interrumpe la ejecución de pavimentos por las estrictas condiciones meteorológicas, y es en este periodo cuando se dieron las circunstancias positivas de disponibilidad para el traslado de los equipos. Por tanto, la franja temporal para la ejecución fue fijada en el primer trimestre de 2010.
- **Concordancia temporal.** Acotada la franja temporal para la ejecución, según la premisa anterior, se buscó el tramo que, por programación de obra, fuese compatible, esto es, estuviera preparado para abordar la fase de pavimento.

El tramo que respondía a los requisitos anteriores y que fue designado para la ejecución de este proyecto de demostración transcurre mayoritariamente en desmonte y

tiene dos tipologías de secciones: sección en túnel (676 m) y sección a cielo abierto (236 m). Esta diferente tipología se considera un valor añadido en la demostración, al poder obtener un abanico de datos mayor en cuanto a ejecución y resultados del pavimento. La figura 8.2 presenta las secciones transversales de este proyecto, tanto del tramo a cielo abierto (a) como en túnel (b), en ella puede verse que hay un cambio de pendiente entre ambas.

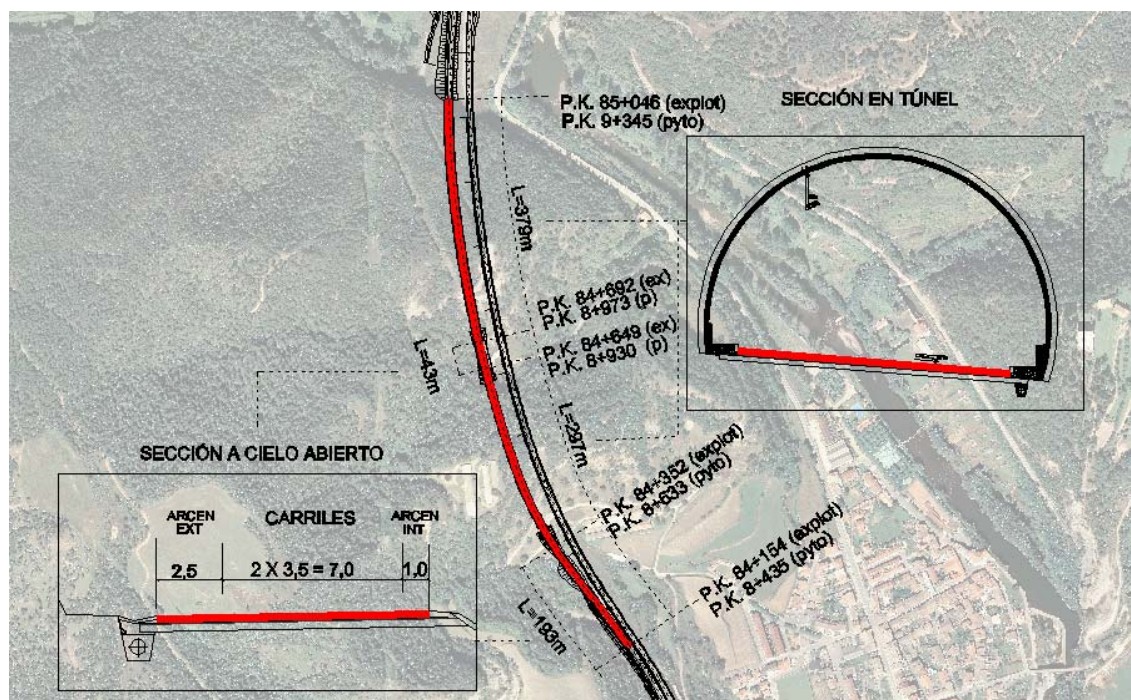


Figura 8.2.- Secciones transversales: a) a cielo abierto y b) en túnel

En este documento, las referencias de datos geométricos lineales se ha hecho en base a las puntos kilométricos de explotación (p.k explot.). Estos fueron determinados por la administración de carreteras una vez entregada la obra, utilizando como referencia los puntos kilométricos de proyecto (p.k pyto). La figura 8.2 muestra ambos datos en los puntos más significativos. Se ha de tener en cuenta que las longitudes de los tramos a cielo abierto y túnel se obtienen en base a los p.k de proyecto.

## 8.2.- PROYECTO

### 8.2.1.- Características principales del proyecto

La iniciativa de esta demostración incorpora la experiencia de ejecución de firmes de pavimentos de hormigón en el norte y centro de Europa. En estos países, el uso de hormigón en carreteras de alta intensidad está ampliamente difundido y esta es la razón por la cual este proyecto de demostración considera además de las normativas propias de nuestro país, las normativas austríacas citadas anteriormente en el apartado 2.2.

Las variables de proyecto consideradas son las siguientes: tráfico (**T1**), explanada: **E3** (caracterizada con un módulo de deformación en el segundo ciclo de placa de carga mayor o igual a 300 MPa) y periodos de proyecto: **30 años** y se define una calzada de **10,5 m** con dos carriles de 3,5 m de amplitud. El arcén exterior tiene una amplitud de 2,5 m y el arcén interior de 1 m. En la tabla 8.1 se presentan las características Principales del proyecto piloto.

Datos básicos del proyecto		
Tramo	Ubicación: Masies de Voltregà	Enlace
	Longitud total	912 m
	Puntos kilométricos	Pk(84+154)-Pk(85+046)
Categoría de tráfico	Trafico pesado	T1
Geometría de sección	Ancho total	10,5 m
	Número de carriles	2
	Dimensión carriles	3,5 m
	Arcén exterior	2,5 m
	Arcén interior	1 m
Geometría de firme	Espesor total firme rígido bicapa	25 cm
	Capa de rodadura de firme bicapa	5 cm
	Capa de base de firme bicapa	20 cm
	Mezcla bituminosa en caliente	5 cm
	Explanada estabilizada con cemento	25 cm

Tabla 8.1.- Datos básicos del Proyecto de demostración de firme rígido carretera C-17

La categoría de tráfico pesado en este proyecto es **T1**, lo que implica un Intesidad Media de Vehículos Pesados por día comprendida entre 2000 y 800 ( $2000 > \text{IMDp} > 800$ ). Dado que en este proyecto de demostración se utiliza la referencia de secciones de firme de la Instrucción austriaca, se ha estudiado la correlación entre las diferentes categorías del tráfico de las dos normativas, con el fin fijar el mismo marco de referencia, tal como se muestra en la figura 8.3, de acuerdo al procedimiento descrito en la tabla 2.1.

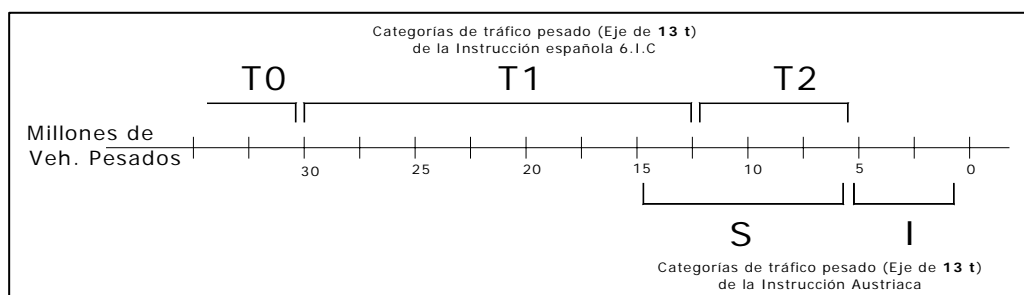


Figura 8.3.- Categorías de tráfico



Debe recordarse que la Instrucción austriaca considera las categorías de tráfico (S, I, II, III, IV, V) en función del número de ejes de 10 t soportados durante el funcionamiento del firme. En cambio, la Instrucción española define las categorías de tráfico (T00, T1, T2, T3) por intensidades medias diarias de vehículos pesados con ejes equivalentes de 13 t. En la tabla 2.1 del capítulo 2 se presentan las equivalencias entre ambas normativas.

La capa de coronación de la explanada dispuesta en la obra está formada por 25 cm de suelo estabilizado in situ con cemento (**S-EST3**). Las especificaciones de este suelo estabilizado son las marcadas en el artículo 512 del PG3, que fija un contenido mínimo de cemento del 3% y una resistencia a siete días y al 98% de compactación mayor de 1,5 MPa. De acuerdo con la Instrucción Española de Firmes 6.I.C, la configuración de explanada descrita se define como **E3**, con un módulo de compresibilidad en el segundo ciclo de carga de  $E_{v2} > 300$  MPa.

Por otro lado, los aspectos más innovadores de este tipo de pavimento son los siguientes:

- **Procedimiento constructivo:** el pavimento se ejecuta en dos capas, de modo que una primera extendedora coloca los 20 cm inferiores de la capa de hormigón, y una segunda extendedora, dispuesta de manera coordinada con la primera, extiende los 5 cm restantes correspondientes a la capa de rodadura. Dicha coordinación asegura la adherencia entre dichas capas.
- **Mejora en la protección de la explanada.** Al disponer una capa de 5 cm de mezclas bituminosas en caliente entre el pavimento de hormigón y la explanada, se limita el daño que el agua infiltrada por las juntas pudiera causar, así como el ascenso de finos por erosión de la base bajo la acción de las cargas de tráfico.
- **Textura del pavimento:** Mediante la realización de un denudado químico y el posterior barrido de la superficie, se logra una capa de rodadura con los áridos expuestos, lo que confiere una mayor macrotextura y una menor sonoridad.

### 8.2.2.- Solución de firme adoptada

En el *Proyecto de Mejora general, desdoblamiento y acondicionamiento de la carretera C-17*, la sección de firme propuesta inicialmente, era la sección 132 de la Instrucción 6.1 IC Secciones de firmes, para el tráfico T1, sobre una explanada E3, constituida de la siguiente manera:

- 3 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo M-10
- 7 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo S-20
- 10 cm de mezcla bituminosa en caliente tipo G-20
- 20 cm de suelo cemento
- Explanada E3 (caracterizada con un módulo de deformación en el segundo ciclo de placa de carga de 300 MPa).



*Posteriormente*, se aceptó la posibilidad de un Proyecto de demostración de firme de hormigón bicapa con la sección de firme que se especifica en la normativa austriaca para la categoría de tráfico máxima (**S**), para una explanada con módulo de compresibilidad para el segundo ciclo de carga ( $E > 35 \text{ MN/m}^2$ ).

Esta sección está conformada por **25 cm de hormigón**, apoyado sobre una capa de **25 cm de material estabilizado con cemento**, correspondiente a la coronación de la explanada. Entre ambas capas se dispone **5 cm de mezcla bituminosa** en caliente con objeto de evitar que el agua que pudiera infiltrarse por las juntas, combinada con la acción del tráfico, dañe la explanada disminuyendo su capacidad soporte y su estabilidad, repercutiendo negativamente en la durabilidad del firme.

La denominación de **bicapa** de este pavimento responde a la definición de dos capas en el paquete global de hormigón (25 cm) descrito: capa de base (20 cm) y capa de rodadura (5 cm). Ambas responden estructuralmente a las solicitaciones, siendo el objetivo de su diferenciación el de poder optimizar la calidad de materiales y prestaciones del firme en la capa de rodadura. Las características de estas capas son las siguientes:

- La **capa de base** es la capa inferior en contacto con la mezcla asfáltica, de 20 cm de espesor, constituida por un hormigón de resistencia a tracción indirecta mayor de  $2,5 \text{ N/mm}^2$ , para un valor y mayor de  $3,5 \text{ N/mm}^2$ , para la media de tres valores. El árido que se usa en este hormigón es calcáreo con tamaño máximo de 32 mm.
- La **capa de rodadura** es la capa superficial en contacto directo con el tráfico, de 5 cm de espesor, de hormigón de resistencia a tracción indirecta mayor de  $3,2 \text{ N/mm}^2$  para un valor y mayor de  $4,2 \text{ N/mm}^2$  para la media de tres valores. El árido que se usa en este hormigón es silíceo con tamaño máximo de 11 mm.

La Instrucción austriaca define un espesor mínimo para la capa de rodadura de 4 cm, si bien en este proyecto de demostración se ha optado por incrementar en 1 cm este espesor. Las razones que justifican este incremento se basan en la consideración de los diferentes rangos de variación de temperaturas en climas cálidos frente a climas fríos. En la zona de ejecución de este proyecto los gradientes térmicos son más elevados que en la zona centro-europea de referencia, y este factor puede contribuir a un mayor riesgo de despegue de la capa superficial por los esfuerzos tangenciales generados debidos a los incrementos de temperatura.

### 8.2.3.- Aspectos específicos del proyecto

#### Barras de atado y pasadores

La barras de atado y pasadores se colocan durante el proceso de extendido del hormigón y se ubican en las zonas del pavimento en las que posteriormente se ejecutará la juntas longitudinales y transversales, tal como se ha visto en capítulos anteriores y se muestra en la figura 8.4 para el caso de la experiencia piloto.

Las **barras de atado** son barras corrugadas de acero de 14 mm diámetro y 700 mm de longitud que se disponen cada 1,5 m, colocándose en la vertical de la junta longitudinal, de forma perpendicular a esta, a una profundidad de dos tercios del espesor de la losa medidos desde la superficie de esta. La calidad del acero es B St 500 S (B). Estos elementos fueron proporcionados por la casa BRENTZEL.

Los **pasadores** con barras lisas de 25 mm diámetro y 500 mm longitud y se colocan, una vez extendido el hormigón, en la mitad del espesor de la losa. Se colocan 26 unidades en la vertical de la junta transversal y perpendicularmente a esta. El espaciado entre ellas varía en función de la zona de rodada de los vehículos y de la distancia a las juntas longitudinales: cada 25 cm en la zona de rodada de los vehículos, en el resto, cada 50 cm aproximadamente. La calidad del acero es St 37-2 (EN 10025-2). Los pasadores fueron, asimismo, proporcionados por la casa BRENTZEL.

### Juntas

El pavimento de hormigón que se define tiene como dimensiones totales 10,5 m de anchura y 866 m de longitud. Sobre él, se definen las juntas longitudinales y transversales que inducen y controlan la fisuración de la sección de hormigón. Estas juntas se realizan por serrado una vez endurecido el hormigón (20 h aproximadamente desde la extensión), transcurridos varios días desde el corte, se cajean y sellan.

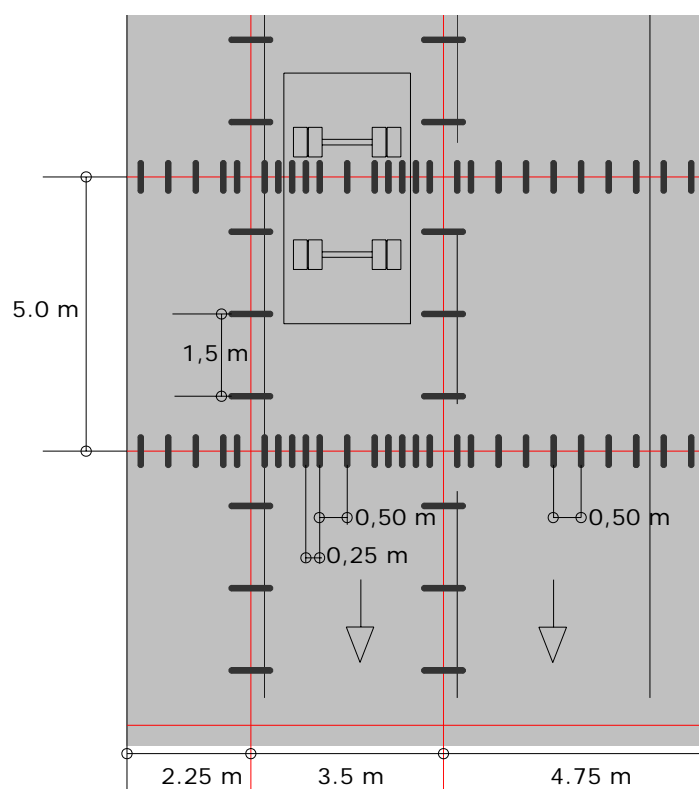


Figura 8.4.- Planta de distribución de pasadores, barras de atado y juntas

Las **juntas longitudinales** que se plantearon en este caso fueron dos, situadas a 2,25 m y 5,75 m del borde exterior de las losas en el sentido de la marcha, lo que implica una distancia de 4,75 m del extremo que alberga el arcén interior, tal como puede verse en la figura 8.4. La profundidad de corte de la junta longitudinal es de 10 cm, siendo el ancho de corte de 8 mm en la zona superficial y 2-3,5 mm en la zona más profunda de la junta, tal como puede verse en la figura 8.5. a)

Las **juntas transversales** en éste proyecto de demostración se sitúan a una distancia de 4,5 m en los tramos a cielo abierto y 5,0 m en los tramos de túnel (fig 8.4). Ésta distinción viene dada por el diferente valor del gradiente térmico en dichas zonas. Esta junta comparte las características de sección de la junta longitudinal excepto la profundidad de corte que en este caso es inferior (75 mm), tal como puede verse en la figura 8.5. b)

Tras los cortes de ambas juntas se hace un **cajeado** en los 20 mm superiores, un biselado de los bordes y un **sellado** posterior de las mismas. (figura 8.5.c)

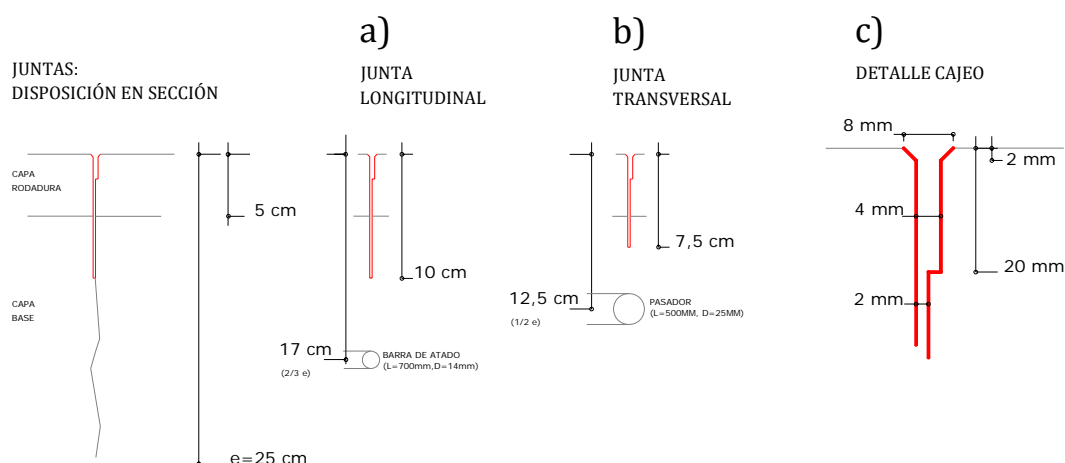


Figura 8.5.- Sección transversal juntas longitudinales(a), transversales (b), detalle de cajeo y biselado(c)

## 8.3.- MATERIALES

### 8.3.1.- Mezcla bituminosa de regularización

El material utilizado para la capa de regularización fue una mezcla bituminosa AC22 BIN 50/70 S (antigua S20) con árido calizo

### 8.3.2.- Áridos

Las especificaciones de los áridos usados difieren según el tipo de hormigón, el cual responde a la función principal de cada capa. Así en la capa de rodadura el hormigón debe dar respuesta a valores elevados de resistencia al desgaste medido por el Coeficiente de Pulimento Acelerado (CPA). En la tabla 8.2, se presentan las exigencias para los hormigones correspondientes a la capa de base y a la capa de rodadura.

Los áridos del hormigón de la capa de base eran calizos de machaqueo, suministrados por la empresa Arenas y Gravas Castellot y procedentes de la cantera Can Carriel, situada en Orís (Barcelona), mientras que los áridos de la capa de rodadura eran suministrados por la empresa Serviá Cantó, procedentes de la cantera Mas Sabé S.L., situada en Sils (Girona), para las arenas de tipo silíceo y de la cantera El Pilar situada en Palamós (Girona) para la gravilla de tipo porfídico.

Características	Base	Rodadura
Arena (en mm)	0/4 Calizo	0/1-2 Silicio
Gravilla (en mm)	5/12 Calizo	4/11 Porfídico
Grava (en mm)	12/20 Calizo	
Tamaño máximo del árido (EN 12620)	20 mm	11 mm
Coeficiente de forma (EN 933-4)	> 40 (SI40)	> 40 (SI40)
Categoría de graduación árido fino (EN 12620)	G <sub>F</sub> 85	G <sub>F</sub> 85
Categoría de graduación árido grueso (EN 12620)	G <sub>C</sub> 90/15 o G <sub>C</sub> 85/20	G <sub>C</sub> 90/15
Equivalente de arena (EN 933-8)	> 80	
Índice de las (EN 933-3)	< 35 en gravilla y grava	
Porcentaje de caras de fractura (EN 933-5)		> 90%, C90/1 (*)
Ensayo de desgaste de Los Ángeles (EN 1097-2)	<30 (LA30)	<20 (LA20)
Ensayo de Pulimento acelerado (EN 1097-8)		> 50 (PSV50)
Sulfatos solubles en ácido (EN 1744-1)	< 0,8	

(\*) Máximo 1% de partículas totalmente redondeadas)

Tabla 8.2.- Características de los materiales

### 8.3.3.- Cemento

El cemento utilizado ha sido un cemento tipo **CEM II/A-M (V-L) 42,5R** molido especialmente para esta obra en la fábrica de UNILAND en Vallcarca (Barcelona). Este cemento, cumple la normativa española y respeta las especificaciones de la Normativa

austriaca en cuanto a principio de fraguado, resistencia y temperatura de amasado. Sus características son:

- Molido con una finura Blaine inferior a los 4000 gr/cm<sup>2</sup>.
- Principio de fraguado superior a 120 minutos
- Resistencia a flexión en probeta de mortero superior a los 7 MPa a los 28 días
- Adiciones: 11% de cenizas volantes y 6% de filler calizo
- Temperatura máxima del cemento en el momento de amasado del hormigón ( $T < 80^{\circ}\text{C}$ ).

#### 8.3.4.- Aditivos

Los aditivos utilizados cumplían las exigencias del Artículo 29 de EHE 08 (2008) y fueron los siguientes: Aireante MAPEPAST PT2 y Superfluidificante DYNAMON SX

#### 8.3.5.- Características de los hormigones

Para dar respuesta a las diferentes exigencias estructurales y funcionales de la capa de base y de la capa de rodadura del pavimento de hormigón se plantean dos hormigones diferentes cuyos requerimientos se muestran en la tabla 8.3. En ella puede verse que a ambos hormigones se les pide un contenido de aire ocluido entre el 4 y 6 %, de cara, por un lado, a evitar problemas ante los ciclos hielo-deshielo previsibles en la zona una vez el hormigón ha endurecido y para facilitar la plasticidad de la puesta en obra de un hormigón deslizado en estado fresco.

Requerimiento	Base	Rodadura
Consistencia	Seca	Seca
Tamaño máximo del árido (en mm)	20	11
Resistencia mínima en ensayo brasileño a 28 días	3,5 MPa	4,2 MPa
Contenido mínimo de cemento	350 kg/m <sup>3</sup>	450 kg/m <sup>3</sup>
Aire ocluido (en %)	4 y 6	4 y 6

*Tabla 8.3.- Requerimientos de los hormigones de ambas capas*

Las dosificaciones de las mezclas, dadas en la tabla 8.4, fueron diseñadas conjuntamente por el personal del Laboratorio Central de FCC y de ALPINE, con objeto de poder cumplir con las especificaciones requeridas. Cabe señalar que dentro de estas especificaciones, la resistencia a compresión se especifica a través de la tracción indirecta obtenida mediante el ensayo brasileño, que es la práctica habitual en los pavimentos austriacos y no tanto del ensayo de flexotracción, más habitual en España.

A estas dosificaciones se les fueron realizando, directamente en obra, modificaciones en la proporción del aditivo superfluidificante empleado en el hormigón de base, siguiendo indicaciones de los técnicos de Alpine, en función de las terminaciones que iban obteniendo en obra, ya que inicialmente no conseguían por el efecto plastificante que el aditivo confiere las condiciones de rigidez recién acabado en el pavimento que buscaban.

HORMIGON BASE		HORMIGON RODADURA	
MATERIA PRIMA	(Kg/m <sup>3</sup> )	MATERIA PRIMA	(Kg/m <sup>3</sup> )
Arena 0/4	700	Arena 0/2	510
Gravilla 5/12	560	Gravilla 4/11	1190
Grava 12/20	560		
Cemento II/A-M(V-L) 42,5R	390	Cemento II/A-M(V-L) 42,5R	480
Agua	175	Agua	195
Relación a/c	0,45	Relación a/c	0,41
Aireante (Mapeplast – litros)	1,60	Aireante (Mapeplast – litros)	0,40
Dinamon SX (Superplast. en l.)	1,70	Dinamon SX (Superplast. en l.)	2,15

*Tabla 8.4.- Dosificaciones empleadas para los hormigones de la capa de base y de la de rodadura*

En el primer curado, el líquido utilizado era una mezcla de retardante (TAL WB-OFK E 4%) y líquido de curado, siendo la dotación de 200 g/m<sup>2</sup>. El líquido del segundo curado (después del barrido) cumplía la norma Europea EN 14754.1. La dotación fue superior a 200 g/m<sup>2</sup>, empleándose un tipo habitual en Austria TALCURE NB 5.

### 8.3.6.- Otros materiales

Los pasadores utilizados eran de 25 mm de diámetro y 500 mm de longitud, cumplían lo especificado en la norma EN 13877.3 con una protección bituminosa o de plástico para evitar la adherencia.

Las barras de unión utilizados eran de diámetro 14 mm y una longitud de 70 cm, estaban protegidos de la corrosión en 20 cm en el centro de la barra. La empresa encargada de la ejecución (ALPINE) confirmó que podrían eventualmente sustituirse por barras de diámetro 12 mm, más habituales en España, de clase B 500 y deben cumplir la norma EN 10080.

Para el sellado de juntas se utilizaron tres materiales:

- un cordón elastomérico (junta longitudinal)
- un sellador bituminoso ZTV Fug-StB 01 del fabricante Bornit (junta longitudinal)

- un perfil en T de material elastomérico (junta transversal)

## 8.4.- EQUIPOS TÉCNICO Y HUMANO

### 8.4.1.- Extendido de la capa de regularización bituminosa

Para el extendido de la capa de regularización bituminosa en caliente se utilizaron los equipos habituales en este tipo de trabajos: extendedora, compactador de rodillos metálicos, compactador de neumáticos y maquinaria auxiliar. El personal necesario para la puesta en obra fue de 8 operarios más encargado.

### 8.4.2.- Fabricación y transporte del hormigón

Para la fabricación y suministro de los hormigones de base y rodadura se eligió una planta ubicada a 18 km del lugar de ejecución del proyecto, la cual disponía de dos líneas de fabricación para cada uno de las tipologías de hormigón:

- **Hormigón de capa Base:** Se ha utilizado una planta marca Alquezar dotada de una amasadora de doble eje horizontal de 4 m<sup>3</sup>. La producción teórica es de 150 m<sup>3</sup>/h y una producción real de 110-120 m<sup>3</sup>/h. La planta cuenta con 6 tolvas de áridos de 100 m<sup>3</sup> en total y 4 silos de cemento de 100 t cada uno (figura 8.6.a).
- **Hormigón de capa rodadura:** Se ha empleado una planta marca Giró dotada de una amasadora marca Galetti de 1 eje horizontal de 1,5 m<sup>3</sup>. La producción teórica es de 50 m<sup>3</sup>/h y una producción real de 40-45 m<sup>3</sup>/h. La planta cuenta con 3 tolvas de áridos de 15 m<sup>3</sup> cada una y 2 silos de cemento de 50 t cada uno (figura 8.6.b).

El transporte de hormigón para la capa de base y rodadura se realizó mediante camiones tipo bañera con una capacidad de 12 m<sup>3</sup> (ver figura 8.6.c). La distancia entre la planta y el lugar de la demostración es de 18 Km. y el tiempo empleado es de 20-25 minutos por trayecto.

El ciclo medio es de unos 70 minutos para el transporte del hormigón de base y de 80 minutos en el de rodadura, incluyendo ida, vuelta y maniobra de descarga. El transporte utiliza un total de 20 camiones de los cuales entre 14/15 se dedican al hormigón de base y 3/4 al de rodadura. Siempre hay algún camión en situación de parada para cumplir la normativa de horas de trabajo continuo para el conductor.





*Figura 8.6.-  
Centrales de hormigonado y  
camión volquete utilizado en  
el transporte*

#### 8.4.3.- Extendido del hormigón

Los trabajos previos a la extensión del hormigón son el lavado de la base bituminosa (Figura 8.7) sobre la que se apoya las losas de hormigón bicapa y la colocación del cable guía de la extendidora mediante cabrestantes (Figura 8.8). Dos juegos de cable y estacas de nivelación completos con dos cabrestantes tensores por juego para la instalación de dos líneas de 1000 ml de cable soporte-guía para los palpadores de nivelación y guiado de las 2 extendedoras y el equipo de textura y curado.

La extendidora de la **capa base** es un equipo de dos orugas marca Wirtgen, modelo SP 1500 L de 272 kW de potencia montada para 10,5 m de ancho de extendido y los siguientes equipos de trabajo: cuchilla de reparto transversal, batería de vibradores en codo, molde de extendido, insertador de pasadores DBI (junta transversal), 2 insertadores de barras (juntas longitudinales) y tolva y cinta de alimentación de segunda extendidora. (Ver figuras 3.3 y 3.14 anteriormente presentadas)



Figura 8.7.- Limpieza base bituminosa



Figura 8.8.- Cabrestante utilizado

La extendidora de la **capa de rodadura** es un equipo de cuatro orugas marca Wirtgen, modelo SP 1500 de 287 kW de potencia montada para 10,5 m de ancho de extendido y los siguientes equipos de trabajo: cuchilla de reparto transversal, batería de vibradores en T invertida, molde de extendido, regla alisadora transversal oscilante, fratasadota tipo “bailarina”, y extensiones de encofrados laterales de losa con cables tensores (Ver figuras 3.4 y 3.14 anteriormente presentadas).

Para la **transferencia del hormigón** de rodadura desde la “bañera” de transporte a la tolva de alimentación de la segunda extendidora, se utilizó una retroexcavadora de neumáticos marca Hyundai, modelo 170w-7 de 87 kW de potencia con cazo ancho (Ver figura 3.1).

Una vez extendido el hormigón por la secuencia de las dos extendedoras descritas, interviene la **maquinaria de curado**, la cual se trata de un equipo Wirtgen TCM 1800 de 42 kW de potencia montada para 10,5 m de ancho de losa y cuatro orugas de accionamiento hidráulico con sistema de riego transversal y pasillo de trabajo. Esta máquina no lleva incorporado equipo de textura (Ver figura 3.5).

#### 8.4.4.- Terminación y corte de juntas

El barrido del pavimento se realiza con una Motoniveladora Bomag BG 90 adaptada como barredora mediante la instalación de un cepillo en el círculo de la cuchilla y otro en la parte frontal (Ver figura 3.6). La extensión del segundo líquido de curado se realiza con un Minitractor agrícola marca Steyr de unos 15 kW con depósito de PVC para líquidos y lanza desplegable con boquillas para riego de líquidos (Ver figura 3.8).

La maquinaria usada en el corte de juntas es la siguiente: máquina de corte autopropulsada diesel equipada con disco de corte de diamante, aspirador captador de polvo por vía húmeda y desplazamiento del disco a máquina parada para comienzo y terminación de corte en bordes. Marca LISSMAC, modelo FS 41/4-TT con 65 kW de potencia y 1.450 kg de peso. Equipo de corte autopropulsado diesel equipado con 2 discos

sucesivos para la realización de corte simultáneo a 2 profundidades y 2 espesores diferentes y aspirador captador de polvo por vía húmeda. Marca LISSMAC, modelo TLA FS 41-TT con 65 kW de potencia y 1.970 kg de peso (Ver figura 3.9).

El equipo para sellado de juntas marca BREINING, modelo AFU 800 que inyecta el producto de relleno bituminoso en el interior de las juntas (Ver figura 3.10).

#### **8.4.5.- Equipo humano**

En la demostración se utilizó un turno de presencia de 12 h sin parada para comida. Durante los trabajos de montaje y preparación de dichos equipos si utilizaron el turno completo. En cambio para los días de trabajo de las máquinas en las tareas de extendido de hormigón solo fueron efectivas unas 8 horas, dedicando el resto del tiempo al ajuste, preparación y limpieza de las máquinas.

El equipo está formado por 20 personas, dirigidos por Manfred Sturm, de acuerdo con la estructura definida en el apartado 3.3, En el número citado no se cuenta el personal preciso para la fabricación de hormigón, transporte del mismo y, el correspondiente al laboratorio y al control.

La ubicación de la colocación de los soportes y de los cables de nivelación y dirección, se realiza mediante un topógrafo. En cuanto al extendido del hormigón hay 1 operador en cada entendedora y el carro de curado, con la misión de controlar los equipos. Asimismo se disponen de 2 operarios para el fratasado y refinado de los laterales de la segunda entendedora, 1 operario sobre la regla alisadora transversal oscilante, 3 operarios para revisión y recarga de pasadores, ayuda a diversas tareas, etc.

Del personal de apoyo en las otras labores hay 1 operario de apoyo a la descarga de camiones delante de la primera entendedora, 1 operador de la barredora, 1 operador del tractor y de la cuchilla automotriz para retirada del polvo de barrido. Para el corte y relleno de juntas se dispusieron de 2 operarios.

En cuanto al operador de la excavadora de transporte del hormigón de la capa de rodadura del camión volquete a la tolva receptora, al no ser específico del sistema, fue aportado por FCC Construcción

#### **8.5.- ETAPAS DE CONSTRUCCIÓN**

Con el fin de comprobar el perfecto funcionamiento de todos los elementos de trabajo, se realizó una prueba previa el día 12/03/2010. Se situó la máquina en la traza en el PK 84+154 y antes de comenzar se proyectó agua a presión sobre la capa de aglomerado existente con una cuba movida por un tractor para retirar cualquier resto de barro, suciedad, etc.

Se dispuso una lámina de plástico sobre el aglomerado, con el fin de poder retirar todo el hormigón si había un problema en el funcionamiento de las máquinas, si la calidad no era la adecuada o cualquier otro problema que pudiera aparecer en dicho ensayo y que justificase la demolición de pavimento. Una vez comprobado el funcionamiento se consideró que los equipos estaban dispuestos para comenzar el día 15/03/10 según estaba previsto.

#### 8.5.1.- Preparación de la explanada y capa de regularización

En días previos al comienzo de la demostración se procedió al montaje, a cada lado de la losa a ejecutar, del cable de nivelación y guiado de los equipos de extendido y carro de curado. Cada cable, de una longitud aproximada de 1000 m, se coloca a 1,20 m de los bordes de la losa dejando una plataforma de trabajo de  $10,5+1,2+1,2= 12,90$  m por donde tenían que circular todos los equipos participantes. En la zona de túneles y por razones de gálibos los cables se colocaron a 1 m del borde de losa lo que redujo la plataforma de trabajo a 12,50 m. las picas soporte del cable se dispusieron cada cinco metros y en los extremos se disponía de cabrestantes de tensión que se anclaban al terreno. En la zona entre túneles se dispuso un pequeño tramo sin cable para permitir el cambio de sentido de las bañeras de transporte.

La anchura de la capa de aglomerado de 5 cm de espesor, sobre la que apoya la losa, se incrementó en 70 cm. a cada lado de la misma para que las extendedoras y equipos de curado la utilizarasen como zona de rodadura.

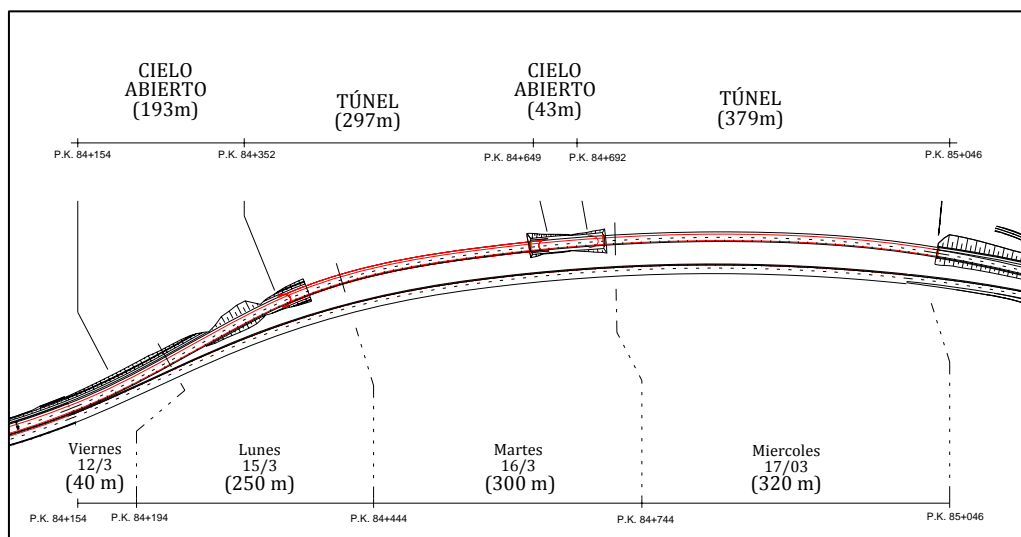
El proceso de limpieza de aglomerado con agua a presión se realizó diariamente antes de comenzar los trabajos de extendido de hormigón en la demostración.

#### 8.5.2.- Extendido de los hormigones

En el tramo de demostración realizado se ha extendido una doble capa de hormigón de 10,5 m de ancho y 866 m de longitud. El volumen de hormigón real consumido ha sido de 2. 652 m<sup>3</sup> frente a los 2.388,75 m<sup>3</sup> teóricos. Se comenzó en el Pk 84+159 con 147 m realizados al exterior, después 297 m en túnel, hasta el (Pk 84+649), seguido de 43 m entre túneles, es decir, en el exterior hasta el (Pk 84+692) y finalmente 379 m en túnel hasta el (Pk 85+053), punto final de la demostración. La demostración terminó justo a la salida del segundo túnel. (Ver figura 8.9)

Por la disposición de la obra, los camiones de transporte de hormigón entraban en la traza al final del tramo de prueba (Pk 85+276) cambiaban de sentido en la zona entre túneles y llegaban, marcha atrás hasta la zona de extendido. Cuando el extendido superó la zona entre túneles el cambio de sentido se realizaba al final del tramo de demostración y desde allí marcha atrás. El trabajar en túnel supuso una dificultad añadida para el movimiento de camiones marcha atrás y para la operación general de extendido

produciéndose interferencias entre los camiones y la excavadora que alimentaba el hormigón de rodadura.



*Figura 8.9.- Tramos del extendido*

La demostración comenzó el día 15/03/2010 a las 12,30 h con la llegada del primer camión de hormigón de base al comienzo del “tren” de extendido formado por la extendidora Wirtgen SP-1500 L para capa base, la extendidora Wirtgen SP-1500 para capa de rodadura y el equipo de curado Wirtgen TCM 1800. También forman parte del “tren” de extendido la excavadora Hyundai 170 W7 que se ocupa de transferir el hormigón de rodadura desde los camiones de transporte a la tolva-cinta transportadora que, situada en primera línea del tren de extendido, lo lleva por encima de la primera extendidora y vierte delante de la segunda.

El hormigón de ambas capas procedente de las plantas de fabricación, situadas a 18 km del extendido y después de un viaje de 20-25 min de media, llega a la obra con un cono de Abrams del hormigón entre 0 y 1 cm, si bien el cono a la salida de planta estaba entre 3 y 4 cm.

En función de la geometría del volquete del camión la descarga era instantánea o podría durar cierto tiempo al quedar el hormigón compactado por el viaje en las zonas de ángulo del equipo. La descarga de camiones está controlada por el operario de descarga que sabe, en combinación con el operador de la extendidora de base, como de “alargada” debe ser la caída del hormigón para evitar trabajo y pérdida de tiempo a la extendidora en el reparto frente a ella.

El montículo dejado por el camión lo distribuye la extendidora con la cuchilla de reparto transversal, que con la experiencia del operador de la máquina debe conseguir una altura máxima que no obstaculice el avance de la extendidora y que asegure el hormigón



en todo el ancho de la losa (en la figura 8.10a puede verse la cuchilla de la 1ª extendedora antes del extendido y durante el mismo). La cuchilla de la 2ª extendedora es similar.



*Figura 8.10.- Cuchilla extendedora: a) antes del extendido y b) durante el extendido*

El avance de la extendedora va dosificando la entrada del hormigón a través del hueco que deja la elevación de la cuchilla frontal, pasando a la cámara de vibración donde están situados 20 vibradores tipo “codo” que permiten su instalación en posición prácticamente horizontal. En este punto se realiza no sólo la compactación del hormigón en un espesor mayor del que tendrá la losa, sino que se favorece la subida de lechada a la parte superior con objeto de asegurar una superficie de capa con la terminación deseada. De aquí, el hormigón pasa al encofrado deslizante de la extendedora, cuya altura define el espesor de la capa. Este paso, produce una extrusión del hormigón al pasar de una altura mayor, en la cámara de vibración, a otra menor y definitiva en el encofrado.

A la salida del encofrado se dispone, en todo el ancho, el equipo introductor de pasadores para la junta transversal (Ver figura 8.11 a). El mismo dispone de una tolva de carga de pasadores que los va depositando en una cadena continua que los posiciona (mediante una rueda medidora de distancia que actúa automáticamente) en situación de colocación. En ese momento mediante dos horquillas vibrantes, por cada pasador, introducen todos a la vez. En este caso, como se dijo al principio, se colocan 26 pasadores cada distancia de 5 m. y en la mitad del espesor de losa (Ver figura 8.11b). Una vez colocados, se vuelve a cargar pasadores y se colocan en posición a la espera de colocación. Un operario marca el punto exacto de la junta para realizar después el corte con sierra. La señal de estos pasadores queda en la superficie del hormigón a la salida de la primera extendedora, pero no tiene ninguna importancia al no ser capa de terminación vista.



Figura 8.11.- Instalación de pasadores: a) equipo de instalación y b) pasadores instalados

Instalado detrás del equipo de pasadores de la junta transversal y conectado en su estructura, lleva la extendidora dos equipos de introducir barras para las dos juntas longitudinales que hay en el ancho de losa. Se colocan tres pasadores, entre cada dos juntas transversales, a una profundidad dos tercios del canto de la losa. En la figura 8.11b, puede verse la huella de dos de las barras transversales de unión de las juntas longitudinales.

A partir de este momento el extendido entra bajo la acción de la 2ª extendidora. Sobre el hormigón que sale de la 1ª, se vierte el hormigón de rodadura que llega desde el frente del “tren” de extendido a través de la cinta transportadora que a tal efecto está montada en un borde de la 1ª extendidora. La cinta con su tolva de recepción recibe el hormigón de 2ª capa del cazo de la retroexcavadora que lo carga de los camiones de transporte situados en un lateral del frente del “tren” de hormigonado. La posición de la retro ocupando un tercio del frente de la extendidora de 1ª capa da lugar a interferencias en la descarga de los camiones tanto de primera como de 2ª capa.

La extendidora de rodadura recibe el hormigón en uno de los laterales de la losa y lo preextiende el operador con la cuchilla de reparto lateral. El proceso en este equipo, es igual que en la extendidora de base hasta que el hormigón sale del encofrado de la máquina con la única salvedad del equipo de vibrado que monta. En este caso los vibradores son tipo “T” invertida y van todos prácticamente juntos unos a otros para asegurar la perfecta vibración de la capa de rodadura con su pequeño espesor. El total de vibradores es de 17 unidades horizontales.

Conviene que no se produzca una acumulación excesiva de hormigón delante de la regla vibrante con el fin de evitar problemas de regularidad superficial. En la figura 8.12 puede verse dos situaciones, así en la parte a, se ve una acumulación correcta, mientras que en la parte b se ve un exceso de acumulación del hormigón.



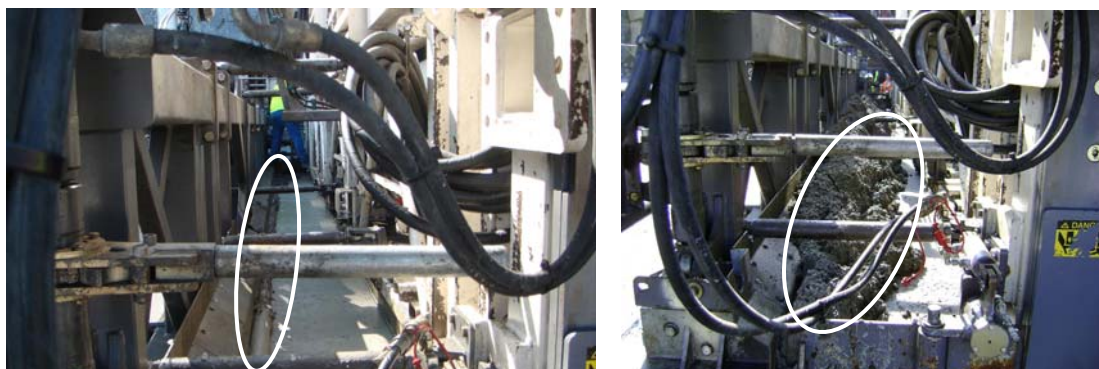


Figura 8.12.- Acumulación hormigón delante de la regla oscilante: a) correcta y b) excesiva

A la salida del encofrado, se trata la superficie resultante con la acción de la regla alisadora transversal oscilante, delante de la cual, el propio hormigón forma un rodillo de lechada que permite con un efecto de fratasado corregir cualquier desperfecto de la superficie. La terminación definitiva de la superficie la realiza la superllana oscilante transversal (Figura 3.20) colocada a continuación de la regla alisadora. A partir de este punto la superficie es sometida a los repastos que sean necesarios para corregir pequeños defectos en la misma (Figura 3.25). Para ello, dos operarios a cada lado de la losa actúan en los puntos necesarios. Un tercero sobre el puente del equipo de curado realiza la misma función sobre el resto de la superficie.

#### 8.5.3.- Primer curado, barrido y segundo curado

Una vez terminados los retoques, se pulveriza un líquido mezcla de un retardador y un líquido de curado, tal como puede verse en la figuras 3.5. Con posterioridad, en función de la climatología y el fraguado del cemento, se procede a partir de las 4 horas y como máximo al día siguiente, al denudado de la superficie de la losa mediante su barrido, consiguiendo áridos expuestos para mejor la textura y la sonoridad. Debido a la gran cantidad de fino que se obtiene, se requiere un equipo de barrido potente para una buena efectividad en la limpieza (ver figura 3.6). Mediante una minihoja de un eje autopropulsada, se consigue eliminar de la losa, los montones de finos generados por la barredora. (ver figura 3.7)

Una vez terminada la limpieza de la superficie se pulveriza el líquido filmógeno para el segundo y definitivo curado, con un minitractor agrícola con lanza desplegable de riego (ver figura 3.8).

#### 8.5.4.- Corte y sellado de juntas

En función de la climatología, pero generalmente a una edad del hormigón no superior a las 24 horas se realizó el corte de juntas con sierra de disco. En la prueba se realizaron entre 20 y 24 horas. Las señales en los laterales de la losa, dejadas por los operarios en el extendido indican la situación de las juntas transversales. Esto permite

realizar el marcado de las mismas sobre el pavimento e igualmente las dos longitudinales, realizando la cuadrícula prevista en el esquema de disposición de juntas.

Las máquinas utilizadas (ver apartado 3.2.4) vienen preparadas para realizar la junta transversal con un disco de 4 mm una de ellas y la otra para la junta longitudinal con dos discos, uno a continuación de otro y con diferente profundidad, de acuerdo con la tipología de la junta descrita en el apartado 8.2.3.

La junta transversal se realizó mediante un solo corte de 4 mm a una profundidad de 75 mm (aprox. 1/3 del espesor de la losa). Posteriormente se realizó un cajeado para aumentar su ancho a 8 mm en una profundidad de 20 mm. Como última operación se realizó el biselado de los bordes.

La junta longitudinal se realizó mediante un corte con dos discos de 4 mm cada uno, que permitió profundizar hasta 100 mm con un ancho de 4 mm (primer disco) y cajear en una profundidad de 20 mm hasta un ancho de 8 mm (segundo disco). Posteriormente se realizó el biselado de los bordes.

El equipo que realiza la junta transversal dispone de carro móvil para el disco que facilita poder realizar el comienzo y la terminación de la junta en todo el ancho de la losa. Ambas disponen de captador de polvo por vía húmeda.

Transcurridos de 20 días desde el corte de las juntas (7 y 8 de Abril) se procedió al relleno de éstas. Dentro del cajeado de la junta longitudinal se introduce un cordón elastomérico en el fondo del cajeado. El sellado de la junta transversal se realiza mediante un perfil plástico introducido a presión y, finalmente, se sella la junta longitudinal con un producto bituminoso.

#### **8.5.5.- Juntas de fin de día**

Al final de la jornada diaria, se interrumpe el hormigonado continuo del día y se realiza una junta transversal de construcción con pasadores. Cuando la primera entendedora llega al punto de corte se prepara un encofrado con la altura de la losa de dos capas fijándolo al terreno. Se hace avanzar el tren de extendido y se rellena de hormigón hasta la junta sacando el hormigón sobrante por delante de ella y eliminándolo con la retroexcavadora que lo carga al vertedero. Previamente, se ha colocado una lámina plástica desde la junta hacia la zona no hormigonada para protección de la capa de aglomerado contra el hormigón sobrante que pudiera deteriorarla o mancharla.

A la mañana siguiente, se retira el encofrado, se perforan los taladros de los pasadores, en el canto transversal de la losa (junta), con un equipo manual de perforación. Se introducen los pasadores hasta la mitad de su longitud y la junta queda terminada para comenzar el extendido a partir de ella.

### 8.5.6.- Rendimientos y consumos

A continuación se muestran los datos reales de rendimiento por día, horas trabajadas, volúmenes de hormigón, etc.

Como se puede observar en la tabla 8.5, el primer día se realizó un pequeño tramo para la prueba de equipos, calidad del hormigón, ajuste en la fórmula, etc. En el resto de la demostración el rendimiento fue más uniforme con longitudes de tramo mayores hasta completar la longitud total de 866 m con un volumen real total de 2.652 m<sup>3</sup> y unos valores medios de 91,44 m<sup>3</sup>/h que suman 731,58 m<sup>3</sup>/d para una media diaria de trabajo efectivo de 8 horas. El volumen teórico de hormigón es de 2.388,75 m<sup>3</sup> y por tanto existe una desviación del 11 % con respecto al valor teórico.

Fecha	Capa Base		Rodadura		P. k.		Longitud
	m <sup>3</sup>	Nº Bañeras	m <sup>3</sup>	Nº Bañeras	Inicio	Fin	Tramo
12/03/2010	72	6	36	3	84+154	84+194	40
15/03/2010	552	46	178,5	17	84+194	84+444	250
16/03/2010	648	54	210	20	84+444	84+744	300
17/03/2010	756	63	199,5	19	84+744	85+046	320
<b>TOTAL</b>	<b>2.028</b>	<b>169</b>	<b>624</b>	<b>59</b>			<b>910</b>

Tabla 8.5.- Rendimientos y consumos

Los equipos de extendido, el carro de curado, el tractor, la barredora y las cortadoras han consumido una media de 1000 litros/día de combustible.

### 8.5.7.- Observaciones y recomendaciones de ejecución

Durante el desarrollo de la ejecución del firme han aparecido diversos problemas que conviene evitar con el fin de mejorar el acabado de la losa. En función de la calidad del hormigón suministrado, consistencia, plasticidad, cantidad de agua, etc. pueden aparecer fenómenos indeseados que impiden una buena terminación:

- Aparición de coqueras en la superficie después del fratasado con la “bailarina” que deben ser rellenadas a mano con un poco de hormigón y un trabajo del peón en el refino de la zona.
- Aparición de algún bache sobre la capa de rodadura que se observan fácilmente con la ayuda de una regla de 2 metros de aluminio manejada por un peón desde el carro de curado. También debe ser rellenado con hormigón y terminado a mano por el peón que detectó dicho defecto.

- Paradas por falta de suministro de hormigón debidos a problemas técnicos en la planta, reajustes de la fórmula en los primeros metros del tramo o bien por mala coordinación en el traslado del hormigón desde la planta al tajo, poco espacio para maniobras del camión en la parte delantera de la primera extendedora, interferencias con la máquina excavadora en la descarga de camiones, etc
- Acumulación excesiva de hormigón de la capa de rodadura delante de la regla transversal oscilante debido a un mal reparto del hormigón sobrante en la parte delantera de la segunda extendedora o a una mala consistencia del hormigón. En éste caso fue necesario la elevación de la extendedora y el retroceso de la misma hasta permitir que el hormigón sobrante se redistribuya de nuevo y conseguir la cota final de la capa superior

La buena calidad del hormigón y un buen vibrado así como un buen control del hormigón que llega a la regla permiten formar un pequeño “rollo” o lámina enrollada de hormigón sobrante, formada por lechada y finos sobre la capa de rodadura y por delante de la regla oscilante que consigue un buen acabado posterior del firme.

Como conclusión se puede afirmar que se puede conseguir un acabado de la losa excelente si ofrecemos a las máquinas un hormigón de calidad y uniforme así como un buen suministro del mismo, ya que las máquinas son las mismas durante todo el tramo y el equipo humano tiene gran experiencia en la ejecución de éstos firmes.

## 8.6.- CONTROL DE CALIDAD

El objetivo de este apartado es presentar los resultados de los trabajos de control de calidad realizados sobre el pavimento. Se describen los datos de control según las diferentes unidades de obra del pavimento y sobre estas, se enumeran los controles efectuados, el método utilizado y los resultados obtenidos.

### 8.6.1.- Control de los datos meteorológicos

La estación meteorológica más cercana (1,5-2,5 km) al lugar de ejecución del proyecto es la estación automatizada de Montesquiú. Los datos meteorológicos obtenidos para el periodo 15/03/2010 al 8/04/2010 fueron: Temperatura, Humedad relativa, Precipitación, Velocidad y dirección media del viento, Presión atmosférica e Irradiación solar global.

En la tabla 8.6 se muestran en valores medios de los registros por horas en los tres días de ejecución del proyecto piloto (15, 16 y 17 de Marzo 2010) más el siguiente día (18 de marzo de 2010). Se disponen de registros hasta el día 8 de abril de 2010, si bien no son relevantes para lo que sigue. En ella puede verse que el clima responde a las características de un clima continental, con cambios altos a lo largo del día. Asimismo se observa que a medida que aumenta la temperatura media a lo largo del día decrece la

humedad relativa, esto es mantiene un comportamiento inverso de forma análoga a la que señala (Puig *et al.*, 2010). El ambiente más seco coincide con la mayor temperatura y la mayor radiación solar incidente.

Franjas horarias	(00:00-01:00)	(06:00-07:00)	(12:00-13:00)	(18:00-19:00)
Temperatura(°C)	0,12	-1,37	14,57	9,10
Humedad relativa (%)	86,25	84,5	30,5	57,5
Precipitación acumulada (mm)	0	0	0	0
Velocidad media del viento (m/s)	0,77	0,60	1,32	0,70
Dirección media del Viento (°)	353,5	350,75	167,75	81,25
Presión atmosférica (hPa)	1029,75	1029,75	1025,25	1026,75
Irradiación solar global (W/m2)	4,00	29,75	746,50	4,02

Tabla 8.6.- Datos meteorológicos medios en los días 15, 16, 17 y 18 de Marzo de 2010

Asimismo, en dicha tabla puede observarse que no llovió en esos días, siendo la velocidad del viento mayor asociado al instante de mayor temperatura, lo que aumenta el riesgo de fisuras de retracción por secado, de ahí la importancia del segundo curado. Por otro lado, puede verse que la dirección del viento rola a lo largo del día, con pequeñas dispersión salvo en la franja horaria de las 18:00 a las 19:00 donde la dispersión es mayor. En cuanto a la presión atmosférica las diferencias no son muy importantes en el período analizado.

### 8.6.2.- Control de la explanada

Para el control de calidad de la explanada se realizaron las siguientes pruebas sobre los materiales y comprobaciones geométricas:

- Cotas cada 10 m con una tolerancia de  $\pm 2$  cm realizada mediante topografía. En cada perfil kilométrico se ha tomado medidas en cinco (5) puntos de la sección transversal que coinciden con los límites entre carriles y arcenes (3), y bordes de la calzada (2).
- Resistencia a compresión mediante probetas de acuerdo a la norma NLT-305:1990
- Módulo de deformación de la explanada mediante Placa de carga / deflectómetro
- Densidades y Humedades mediante sonda nuclear con un equipo tipo TROSLER

De los 450 puntos controlados respecto a la nivelación de la explanada, en 44 puntos (lo que representa un 10 %), se encontraron valores con unas desviaciones mayores a las tolerancias prescritas (tolerancia  $\pm 2$  cm) con unas diferencias máximas, respecto a las cotas teóricas, de entre -2,1 y -3,4 cm. Esto es, por debajo de la cota teórica en los puntos de mayor desviación.

Por otro lado, se efectuaron los controles de resistencia y compactación de la capa de coronación de la explanada de suelo estabilizado con cemento mediante rotura de probetas a compresión, ensayos de placa de carga con resultados todos ellos satisfactorios y que cumplieran un módulo de deformación en el segundo ciclo de carga mayor de 300 MPa y control de densidades y humedades.

En la tabla 8.7 se presentan los resultados obtenidos de estas propiedades para el Tramo 3A correspondiente a la experiencia piloto. En ella puede verse que la resistencia a compresión de las probetas testigos de la explanada es, en todos los casos, superior al valor de 1,5 MPa requerido, con una dispersión pequeña en el caso de que el valor señalado sea la media de 2 o más probetas.

		Lote				
		36	37	38	39	40
Resistencia a compresión (en MPa)	Fecha	15/02/10	16/02/10	16/02/10	17/02/10	18/02/10
	Localización	84.149-84.229	84.909-85.091	84.909-84.609	84.339-84.609	84.339-84.229
	3 días	1,50	2,00	2,10	2,00	2,30
	4 días	--	--	--	--	2,45 (*)
	5 días	--	--	--	2,9 (*)	--
	7 días	2,30 (+)	3,00 (+)	3,05 (+)	3,75 (*)	3,35 (*)
Densidades <i>in situ</i>	Localización	84.149-84.229	84.909-85.091	84.909-84.609	84.339-84.609	84.339-84.229
	t/m <sup>3</sup>	2,30	2,31	2,32	2,32	2,30
	Humedad(%)	6,0	4,8	5,2	4,7	6,1
	% compact.	100	101	101	100	100
Placa de carga (MPa)	Fecha	23/02/10	22/02/10	22/02/10	22/02/10	23/02/10
	P.K. (en m)	84.157	84.887	84.617	84.507	84.257
	M1	150,00	187,50	155,17	173,08	195,65
	M2	321,43	346,15	321,43	321,43	375,00
	Relación	2,14	1,85	2,07	1,86	1,92
Dotación	Fecha	16/02/10	18/02/10	18/02/10	18/02/10	18/02/10
	P.K. (en m)	84.189	84.919	84.649	84.539	84.289
	g/m <sup>2</sup>	422	416	485	464	506

(+) media de 4 valores (\*) media de 2 valores

Tabla 8.7.- Valores de diversas propiedades de la explanada del tramo piloto

Por otro lado, respecto a la compactación los resultados conducen a una densidad in situ  $\geq 2,30 \text{ t/m}^3$  y un grado de compactación  $\geq$  al 100 % en todos los casos. El grado de humedad de la explanada se ha situado en las cinco determinaciones entre 4,7 y 6,1 %, lo que representa un valor medio de 5,36 %, situándose los extremos a un 13,8 % de diferencia.

La explanada definida en proyecto (E3), debe cumplir un modulo de deformación en el segundo ciclo de carga mayor o igual a 300 MPa y una relación entre módulos del segundo ciclo de carga y primero menor de 2,2. En los ensayos de la placa de carga según NLT 357/98, los resultados correspondientes al módulo de compresibilidad al primer ciclo de carga (M1) se sitúan en el entorno de 150 a 195,65 MPa , los correspondientes al segundo ciclo de carga (M2) se sitúan en el entorno de 321,43 a 375,00 MPa y su relación entre 1,85 y 2,14 . Por último, con respecto a la dotación del riego de imprimación asfáltica sobre el suelo estabilizado, los valores se sitúan en el entorno de 416 a 506 g/m<sup>2</sup>.

#### 8.6.3.- Control de la capa bituminosa en la regularización

Para el control de calidad de la capa bituminosa en la regularización se realizaron las tres comprobaciones descritas a continuación.

- Verificación de las cotas cada 10 a 20 m con una tolerancia de  $\pm 1 \text{ cm}$ , realizada mediante topografía. En cada perfil kilométrico se ha tomado medidas en cuatro (4) puntos de la sección transversal con una equidistancia de 3,5 m.
- Evaluación del espesor de la capa en los testigos extraídos del conjunto de capas.
- Caracterización de dos muestras extraídas del punto PK 9+140 según la norma NLT-121/99. En ellas se han evaluado el contenido de ligante (NLT-164/90), la granulometría de los áridos recuperados en su forma original (NLT-165/90), además de la densidad, de la estabilidad y de la fluencia medidas según el ensayo Marshall (NLT-159/86).

El control de nivelación de la capa de aglomerado mostró unas diferencias máximas, respecto a las cotas teóricas, de -2 cm en 22 puntos de los 356 puntos controlados cuya tolerancia era  $\pm 1 \text{ cm}$ . Esto representa que sólo el 6,17 % de los espesores de esta capa estaba por debajo de las tolerancias establecidas para la misma

Con respecto al espesor de la capa bituminosa que forma parte de la capa de regularización, se extrajeron doce (12) testigos del conjunto, de los cuales uno no se pudo utilizar para el control de espesor de aglomerado. En la tabla 8.8 se presentan los resultados obtenidos de los espesores, tanto de esta capa como de las dos capas de hormigón (base y rodadura). El análisis de los resultados de estos últimos se hace en el apartado 8.6.7 correspondiente al control de calidad del pavimento.



PK	Lado	Lote	Ubicación	Aglomerado AC22	Base (en cm)	Rodadura (en cm)	Total (en cm)
84.179	Izquierdo	1	Desmonte	--	20,0	5,7	25,7
84.249	Izquierdo			5,0	22,2	4,8	27,0
84.289	Derecho			5,5	23,5	5,5	29,0
84.399	Izquierdo			7,0	21,0	7,0	28,0
84.449	Derecho	2	Túnel Sora 1	3,7	22,3	4,5	26,8
84.569	Derecho			7,0	18,8	7,6	26,4
84.639	Derecho			5,4	20,4	6,2	26,6
84.699	Izquierdo			6,0	22,5	5,5	28,0
84.759	Izquierdo	3	Túnel Sora 2	10,0	22,0	6,5	28,5
84.789	Derecho			4,0	23,3	2,5	25,8
84.929	Izquierdo			6,0	21,5	5,0	26,5
85.001	Izquierdo			9,1	23,0	4,0	27,0

Tabla 8.8.- Resultados de los espesores de los testigos

El espesor de la capa de aglomerado presente una alta variabilidad, obteniéndose muestras entre 3,7 y 10,0 cm. Cabe recordar que el espesor de esta capa en el proyecto era de 5 cm, pudiéndose observar que dos de las once muestras esto es un 18,18 % está por debajo del valor prescrito. Las dos muestras extraídas del punto PK 9+140 presentaron un porcentaje de ligante sin áridos igual a 4,63 y 4,11, porcentaje de ligante sin mezcla igual a 4,42 y 3,95 y relación filler/betón de 1,21 y 1,70. Los resultados obtenidos en el ensayo Marshall y la granulometría de los áridos para las mismas muestras se presentan en la tabla 8.9.

Ensayo		Muestra 1	Muestra 2
Ensayo Marshall	Densidad relativa (g/cm <sup>3</sup> )	2,38	2,39
	Huecos en los áridos (%)	15,6	15,0
	Huecos en la mezcla (%)	5,4	5,4
	Huecos en la mezcla (%)	65,7	63,7
	Estabilidad (KN)	14,33	17,69
	Fluencia (mm)	2,7	2,2
Granulometría de los áridos	% que pasa por el tamiz	40 mm	100,0
		25 mm	100,0
		20 mm	100,0
		12,5 mm	91,3
		8 mm	74,6
		4 mm	49,4
		2 mm	29,2
		0,5 mm	11,4
		0,25 mm	8,3
		0,125 mm	6,6
		0,063 mm	5,6

Tabla 8.9.- Resultados del ensayo Marshall y de la granulometría de los áridos

### 8.6.4.- Control del hormigón de las distintas capas

#### Ensayos previos

En los meses previos a la ejecución de este proyecto de demostración, en el laboratorio central de la empresa FCC situado en Arganda (Madrid) se realizó un estudio de caracterización de los hormigones que podrían usarse en el proyecto. Este estudio previo contempló los siguientes ensayos sobre los áridos:

- Ensayos físico-químicos sobre los áridos (Tabla 8.10)
- Granulometrías de los áridos (Tabla 8.11)
- Huso granulométrico para dosificación (Tabla 8.12)

Ensayo	CAPA DE BASE			CAPA RODADURA		
	Arena silícea lavada 0/5	Árido calizo 4/12	Árido calizo 12/20	Arena silícea 0/2	Árido pórfido 4/8	Árido pórfido 4/11
Equivalente de Arena (UNE EN 933-8)	82	--	--	90	--	--
Coeficiente de forma (UNE EN 933-4)	--	--	--	--	7	6
Índice de lajas (UNE EN 933-3)	--	10	16	--	12	8
Desgaste (UNE EN 1097-2)	--	23	25	--	13	13
Terrones de arcilla (UNE EN 7133)	--	--	0,02	--	--	--
Sulfatos solubles en ácido (EN 1744-1)	0,07	--	0,06	--	--	--
Resistencia a ciclos hielo-deshielo (UNE EN 1367-2)	--	--	10	--	--	--
Densidad	--	--	--	2,582	--	--
Absorción	--	--	--	0,1	--	--
Coeficiente de pulimento acelerado (UNE EN 1097-8)	--	--	--	--	0,57	--

Tabla 8.10.- Resultados de los ensayos físico-químicos de los áridos

Tamiz	CAPA DE BASE (% PASA)			CAPA RODADURA (% PASA)		
	Arena silícea lavada 0/5	Árido calizo 4/12	Árido calizo 12/20	Arena silícea 0/2	Árido pórfido 4/8	Árido pórfido 4/11
32	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	100,0	100,0	92,4	100,0	100,0	100,0
16	100,0	100,0	47,4	100,0	100,0	100,0
10	100,0	80,8	1,2	100,0	83,1	100,0
8	100,0	46,7	0,8	100,0	39,5	83,6
4	88,0	0,9	0,8	100,0	0,6	3,3
2	59,0	0,4	0,8	96,0	0,3	1,2
1	41,8	0,3	0,7	68,1	0,3	1,0
0,5	25,0	0,3	0,7	39,4	0,3	0,9
0,25	13,6	0,2	0,7	20,5	0,3	0,9
0,125	6,8	0,1	0,6	7,6	0,2	0,7
0,063	2,7	0,1	0,6	2,6	0,1	0,4

*Tabla 8.11.- Resultados de las granulometrías de los áridos*

	HUSO GRANULOMÉTRICO CAPA DE BASE (% PASA)			HUSO GRANULOMÉTRICO CAPA RODADURA (% PASA)			
	Arena silícea lavada 0/5 <b>40% en peso</b>	Árido calizo 4/12 <b>30% en peso</b>	Árido calizo 12/20 <b>30% en peso</b>	Arena silícea 0/2 <b>30% en peso</b>	Árido pórfido 0 4/8 <b>70% en peso</b>	Arena silícea 0/2 <b>30% en peso</b>	Árido pórfido 4/11 <b>70% en peso</b>
<b>Tamiz</b>							
32	100,0			100,0	100,0		
20	97,7			100,0	100,0		
16	84,2			100,0	100,0		
10	64,6			88,2	100,0		
8	54,3			57,6	88,5		
4	35,7			30,4	32,3		
2	23,9			29,0	29,7		
1	17,0			20,7	21,2		
0,5	10,3			12,0	12,5		
0,25	5,7			6,4	6,8		
0,125	2,9			2,4	2,8		
0,063	1,3			0,9	1,1		

*Tabla 8.12.- Resultados de los husos granulométricos de los áridos*

Para cada tipología de hormigón (capa de base y capa de rodadura) se fabricaron dos muestras, presentándose en la tabla 8.13 las dosificaciones utilizadas, así como los resultados obtenidos de resistencias, consistencia, aire ocluido y textura, para cada una de ellas.

Como puede verse en la citada tabla hay unos cambios tanto entre la fase de estudios previos y los posteriores de producción, como de las cantidades de los aditivos (aireante Mapeplast y superplastificante Dinamon SX, ambos de la casa Mapei). Así existen unos cambios, tanto en la cantidad de cemento, como en el propio esqueleto granular. Hay que llamar la atención sobre este punto ya que los trabajos previos en laboratorio no siempre son extrapolables a condiciones de obra por lo que requieren nuevos ajustes sobre las propuestas de partida. En este caso, se tuvo que aumentar la dosificación inicial de aireante para conseguir el aire ocluido fijado y disminuir la dosificación de superplastificante para mantener la consistencia entre 0 y 1 cm.

	CAPA DE BASE			CAPA RODADURA		
Dosificaciones pruebas (Kg/m <sup>3</sup> )	FCC1bp	FCC2bp	Obra	FCC1rp	FCC2rp	Obra
Arena silícea 0/2	--	--		521	526	510
Arena silícea 0/5	792	793	700	--	--	--
Gravilla Pórfido 4/8	--	--		1246	--	--
Gravilla Pórfido 4/11	--	--		--	1251	1190
Gravilla caliza 5/12	598	599	560	--	--	
Grava caliza 12/20	603	604	560	--	--	
Cemento II/AM (V-L) 42,5R	360	360	390	470	460	480
Agua	136	137	175	178	175	195
Relación a/c	0,38	0,38	0,45	0,38	0,38	0,41
Aireante (en litros)	0,2	0,7	1,6	0,9	0,9	(**)
Superplastificante (en litros)	5,1	3,4	(*)	6,6	4,3	(***)
Propiedades hormigón fresco	Ver resultados de control en tabla 8.14			Ver resultados de control en tabla 8.15		
Cono (en cm)						
Aire ocluido (en %)						
Prop. hormigón endurecido	Ver resultados de control en tabla 8.14			Ver resultados de control en tabla 8.15		
Flexotracción 7 días						
Flexotracción 28 días						
Tracción indirecta 7 días						
Tracción indirecta 28 días						
Compresión 7 días						
Compresión 28 días						
Textura						
Círculo de arena (en mm)	--	--		1,0	0,9	

(\*) En las dos primeras muestras (FCC1b y FCC2b) se emplearon 2,18, mientras que en las tres restantes ((FCC3b, FCC4b y FCC5b) se utilizaron 1,68 litros

(\*\*) En la primeras muestra (FCC1r) se emplearon 4,02, mientras que en las cuatro restantes (FCC2r, FCC3r, FCC4r y FCC5r) se utilizaron 2,15 litros

(\*\*\*) En la primera muestra (FCC1r) se emplearon 0,24 litros, en la segunda (FCC2r) se emplearon 0,34 litros, mientras que en las tres restantes (FCC3r, FCC4r y FCC5r) se utilizaron 0,49 litros

Tabla 8.13.- Resultados de caracterización previa de hormigones

#### Ensayos durante el hormigonado

En el proceso de control de calidad de los hormigones de este proyecto piloto intervinieron diversas entidades. Así el **control de producción**, fue realizado por el laboratorio en obra, muy bien dotado de medios, que dispusieron FCC y Pórtland

Valderrivas. En el control de producción se tomaron, como máximo, dos muestras por día, para cada tipología de hormigón (capa de base y capa de rodadura).

En el control de recepción intervinieron las tres entidades siguientes: Paymacotas, Eptisa y la Universidad Politécnica de Catalunya (UPC). Se entiende que esta configuración es redundante y hay que entenderla como una configuración de experiencia piloto en el que se quiere contrastar y disponer de muchos puntos de vista.

Los ensayos utilizados para el control han sido similares a los estudios previos. Así para hormigón fresco se han considerado el ensayo de consistencia según el cono de Abrams, aire ocluido en % y densidad masa fresca), mientras que para hormigón endurecido se han tomado: Resistencias a flexotracción, tracción indirecta y compresión a 7 y 28 días. Para la textura del hormigón de la capa de rodadura se han hecho determinaciones mediante el círculo de arena. Por otro lado se han descartado los ensayos físico-químicos sobre los áridos, que ya se habían realizado en la caracterización previa, entendiendo que no se produce tantos cambios en los días de la experiencia piloto.

En la tabla 8.14 se presentan los resultados de los ensayos de control obtenidos por el laboratorio de obra de FCCSA y Portland Valderrivas, correspondientes al hormigón de la capa de base; mientras que en la tabla 8.15 se muestran los correspondientes a la capa de rodadura.

Muestras	FCC1b	FCC2b	FCC3b	FCC4b	FCC5b		
Datos localización (Día, periodo y P.K.)	15/03	15/03	16/03	16/03	17/03		
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana		
	84.209	84.399	84.469	84.559	84.754		
<b>Hormigón fresco</b>						Media	Desv.
Cono (en cm)	0	3	0	1	0	0,8	1,30
Aire ocluido (en %)	3,60	4,50	4,30	3,80	3,50	3,94	0,44
Densidad	2,40	2,35	2,35	2,37	2,39	2,37	0,02
Compactabilidad	--	--	1,40	1,42	1,30	1,37	0,06
<b>Hormigón endurecido</b>							
Flexotracción 7 días	3,8	--	3,9	4,9	4,7	4,3	0,56
Flexotracción 28 días	4,5	--	5,3	5,6	5,9	5,3	0,60
Tracción indirecta 7 días	3,6	3,7	2,9	3,0	3,7	3,4	0,40
Tracción indirecta 28 días	4,7	4,2	3,8	3,9	4,0	4,1	0,36
Compresión 7 días	42,2	39,2	34,1	33,7	38,7	37,6	3,62
Compresión 28 días	53,8	47,1	42,6	43,4	--	46,7	5,11

*Tabla 8.14.- Resultados del control de producción del hormigón de la capa de base  
(Laboratorio de obra de FCCSA-Portland Valderrivas)*

Muestras	FCC1r	FCC2r	FCC3r	FCC4r	FCC5r		
Datos localización (Día, periodo y P.K.)	15/03	15/03	16/03	16/03	17/03		
	Mañana	Tarde	Mañana	Tarde	Mañana		
	84.244	84.319	84.484	84.669	84.769		
Hormigón fresco						Media	Desv.
Cono (en cm)	1	1	1	0	0,5	0,70	0,45
Aire ocluido (en %)	4,10	3,20	3,10	4,10	4,00	3,70	0,50
Densidad	2,34	2,33	2,36	2,36	2,34	2,35	0,01
Compactabilidad	1,33	1,33	1,33	1,35	1,40	1,35	0,03
Hormigón endurecido						Media	Desv.
Flexotracción 7 días	6,4	5,1	5,8	5,8	5,2	5,7	0,53
Flexotracción 28 días	6,7	6,1	6,4	7,1	6,8	6,6	0,38
Tracción indirecta 7 días	4,3	3,9	3,7		3,7	3,9	0,28
Tracción indirecta 28 días	4,9	4,2	4,8	4,8	4,4	4,6	0,30
Compresión 7 días	52,3	48,4	44,5	48,7	41,9	47,2	4,03
Compresión 28 días	61,0	54,4	52,5	57,1		56,3	3,69
Textura						Media	Desv.
P.K.	8.450	8.500	8.600	8.680	--	--	--
Círculo de arena NLT -335	1,1	1,1	1,0	1,1	--	1,1	0,0

*Tabla 8.15.- Resultados del **control de producción** del hormigón de la **capa de rodadura** (Laboratorio de obra de FCCSA-Portland Valderrivas)*

Por otro lado, en las tablas 8.16 y 8.17 se presentan los valores medios y las desviaciones de los resultados obtenidos tanto del hormigón de la capa de base como de rodadura por cada uno de los laboratorios involucrados. En ellas se toma como contraste los valores presentados anteriormente correspondientes al control de producción.

Aunque no todos los resultados coinciden de la misma toma, las dispersiones obtenidas en cada laboratorio están dentro de un orden de magnitud muy razonables para este tipo de ensayos y muestran que el hormigón suministrado en la prueba era un hormigón bastante homogéneo. Sin embargo cuando se cruzan los resultados entre los laboratorios, las diferencias son, en algunos valores muy relevantes, en línea con experiencia nacionales de contrastes de laboratorios.

Estos resultados deben servir de reflexión cara al futuro, ya sea en cuanto a poner un sistema estricto de calibración de equipo y procedimientos, como de hacer una política de control, más global de tendencias, sin incidir en el resultado individual como elemento de penalización, especialmente cuando se está trabajando con la resistencia a flexotracción.



Laboratorio	FCCSA		PAYMA		EPTISA		UPC <sup>1</sup>
Hormigón fresco	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media
Cono (en cm)	0,80	1,30	0,3	0,42	0,3	0,58	1
Aire ocluido (en %)	3,94	0,44	4,38	0,84	--	--	--
Densidad	2,37	0,02	2,39	0,04	--	--	--
Compactabilidad	1,37	0,06	--	--	--	--	--
Hormigón endurecido	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media
Flexotracción 7 días	4,3	0,56	4,0	0,37	4,6	0,06	4,1
Flexotracción 28 días	5,3	0,60	5,5	0,44	6,2	0,29	4,8
Tracción indirecta 7 días	3,4	0,40	2,8	0,69	3,4	0,38	3,2
Tracción indirecta 28 días	4,1	0,36	3,5	0,46	4,1	0,15	3,7
Compresión 7 días	37,6	3,62	28,6	4,36	37,9	3,65	33,6
Compresión 28 días	46,7	5,11	38,6	4,62	43,9	4,82	54,9

<sup>1</sup> Estos resultados están referidos a una sola toma de muestras

*Tabla 8.16.- Contraste de los resultados del hormigón de la **capa de base***

Muestras	FCCSA		PAYMA		EPTISA		UPC <sup>1</sup>
Hormigón fresco	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	Media
Cono (en cm)	0,70	0,45	0,2	0,41	0,3	0,58	0,0
Aire ocluido (en %)	3,70	0,50	3,80	0,58	--	--	--
Densidad	2,35	0,01	2,39	0,04	--	--	--
Compactabilidad	1,35	0,03	--	--	--	--	--
Hormigón endurecido	Media	Desv.	Media	Desv.	Media	Desv.	--
Flexotracción 7 días	5,7	0,53	4,8	0,54	5,9	0,20	--
Flexotracción 28 días	6,6	0,38	6,8	0,51	7,0	0,42	--
Tracción indirecta 7 días	3,9	0,28	2,8	0,30	4,0	0,15	3,4
Tracción indirecta 28 días	4,6	0,30	3,8	0,72	4,4	0,15	3,8
Compresión 7 días	47,2	4,03	34,9	5,66	44,1	3,43	39,1
Compresión 28 días	56,3	3,69	45,2	3,50	49,1	4,15	56,9
Textura	Media	Desv.	Media	Desv.			
Círculo de arena NLT -335	1,1	0,0	--	--	--	--	--

<sup>1</sup> Estos resultados están referidos a una sola toma de muestras

*Tabla 8.17.- Contraste de los resultados del hormigón de la **capa de rodadura***

#### 8.6.5.- Control de apertura de juntas

Durante los días posteriores a la extensión del hormigón, se realizó un control diario de la apertura de las juntas transversales del pavimento, comprobándose que la apertura de las juntas era más lenta en las zonas centrales de los túneles (10-15 días), lenta en las zonas interiores pero cercanas a las bocas de los túneles (7 días) y rápida en

las zonas a cielo abierto (< de 7 días), lo cual coincide con las condiciones variables termohigrométricas en una u otra zona

#### 8.6.6.- Inspección visual del pavimento

Con el objetivo de detectar desperfectos locales en la losa de hormigón ya endurecida y poderlos reparar, se realizó una inspección visual en la que solo se localizaron dos defectos en los bordes de la losa, producidos por golpes accidentales sobre el hormigón fresco posteriores al paso del tren de extendido.

#### 8.6.7.- Control del pavimento acabado

Para el control de calidad de la losa de hormigón acabada se realizaron las siguientes pruebas sobre los materiales y comprobaciones geométricas:

- Control de nivelación a través de medidas de cotas mediante topografía
- Control de espesores de capas mediante medición directa de testigos extraídos
- Medición de deflexiones mediante deflectómetro de impacto
- Control de adherencia entre capas de hormigón por tracción directa de testigos
- Control de textura por círculo de arena
- Control de regularidad superficial por medición de IRI
- Control del coeficiente de rozamiento transversal por SCRIM
- Control de sonoridad del pavimento

##### Control de nivelación

La rasante de la superficie acabada no debe quedar por debajo de la teórica, en más de diez milímetros (10 mm), ni rebasar a ésta en ningún punto (PG-3).

Para el control de nivelación de la losa de hormigón, se tomaron cotas cada 9 m según el eje en tres puntos diferentes de la sección transversal. De los 201 puntos de control obtenidos, el 28% de ellos quedaban por encima de la rasante teórica, el 7,5 % en la rasante y el 64,5 % por debajo de esta.

Por lo que respecta a los puntos que quedan bajo rasante teórica (64,5%), sólo quince de ellos (7,5% del total) superan los 10 mm de diferencia, con un valor máximo de 14 mm.

En los puntos que quedan por encima de la rasante teórica (28%), superan los 5 mm de diferencia, con un valor máximo de 11 mm.

### Control de espesores

Para el control de espesores se extrajeron un total de 12 testigos en toda la longitud del tramo para controlar los espesores de las distintas capas del pavimento con los siguientes resultados:

- En ningún testigo la suma de espesores de las dos capas fue inferior a 25 cm.
- Hormigón de capa de base: entre 18,8 cm y 23,3 cm, con una media de 21,6 cm y un teórico de 20 cm. El espesor mínimo de 18,8 cm coincide con un espesor de 7,6 en la capa de rodadura.
- Hormigón de capa de rodadura: entre 2,5 cm y 7,6 cm, con una media de 5,4 cm y un teórico de 5 cm. El espesor mínimo de 2,5 cm coincide con un espesor de 23,3 en la capa de base.

Estos mismos testigos se ensayarán para el control de adherencia entre capas.

### Control de deflexiones

Como deflexión patrón se considera la recuperación elástica de la superficie del firme al retirarse dos ruedas gemelas. El método operatorio normalizado es la medida de deflexiones con la viga "Benkelman" según el método de recuperación de la Norma NLT-356/79.

El sentido de las aplicaciones del deflectómetro de impacto para el control de calidad de pavimento de hormigón acabado se basa en los siguientes puntos:

- Análisis de la transferencia de carga entre losas de hormigón en firmes rígidos.
- Detección de huecos bajo las losas de hormigón.

El control se realizó con el **deflectómetro de impacto PRI2100** aplicado en cada uno de los carriles cada veinte metros. Para cada aplicación de carga se obtuvieron los datos de los seis sensores de deflexión que arrojan la deflexión patrón asociada a una presión aplicada sobre el firme.

En el carril de vehículos pesados los datos de **deflexión patrón** expresada en  $10^{-2}$  mm, presentan un rango comprendido entre 7 y 2. En el otro carril este rango está comprendido entre 6 y 2. Se trata en ambos casos, de valores que muestran la ausencia de problemas en el firme.

### Control de adherencia entre capas

Para controlar la adherencia entre las diferentes capas del firme construido, se ensayaron los **testigos perforados en el pavimento a tracción directa**. Los testigos se prepararon para el ensayo uniendo las caras extremas (previamente cortadas para

conseguir una superficie plana) a dos placas metálicas mediante un pegamento G60. En los resultados obtenidos se ha observado el siguiente comportamiento:

- De los testigos que incluían capa de aglomerado, la separación en el ensayo de tracción directa se produce en el interior de la capa de aglomerado.
- De los testigos que solo contenían hormigón de las dos capas, la separación en el ensayo de tracción directa, se produce en la sección pegada a la placa de soporte.

Por tanto, se puede concluir que la adherencia entre aglomerado y hormigón de base es mayor que la propia resistencia a tracción del aglomerado y de los resultados de los testigos de hormigón se puede concluir que la adherencia entre capas de diferentes hormigones es mayor que la resistencia a tracción del propio pegamento.

#### Control de textura

La profundidad media para el círculo de arena en un pavimento de hormigón con textura de arpillera debe estar comprendida entre 0,6 mm y 0,9 mm y ningún resultado individual por debajo de 0,4 mm. Al tratarse en este caso de una textura de árido visto, se podría asimilar a la de las mezclas abiertas, cuya profundidad media debe ser  **$\geq 0,7$  mm y no más de 1 resultado individual por debajo de 0,5 mm.**

Para el control de la textura superficial se realizó el ensayo del círculo de arena cada 20 m según el eje del pavimento. La media de los resultados fue de 0,98 mm, con seis valores (12,5%) menores de 0,82 mm, con un mínimo de 0,53 y un máximo de 1,30 mm.

#### Control de regularidad superficial por medición de IRI

El Índice de Regularidad Internacional (IRI), mide la regularidad superficial según la norma NLT-330. Los valores límites de referencia de este parámetro para autopistas y autovías son los siguientes:

- Para el **50%** de los hectómetros de firme ensayado, el IRI debe ser inferior a 1,5 dm/hm ( **$<1,5$  dm/hm**)
- Para el **80%** de los hectómetros de firme ensayado, el IRI debe ser inferior a 1,8 dm/hm ( **$<1,8$  dm/hm**)
- Para el **100%** de los hectómetros de firme ensayado, el IRI debe ser inferior a 2,0 dm/hm ( **$<2,0$  dm/hm**)

Los datos de IRI obtenidos para cada carril de circulación cada 100 m, se muestran en la tabla 8.18.

% de hectómetros que tienen valores IRI inferiores a:	Carril de vehículos lentos			Carril de vehículos rápidos		
	IRI izq.	IRI der.	IRI Medio	IRI izq.	IRI der.	IRI Medio
<1,5	50%	80%	70%	50%	50%	50%
<1,8	70%	90%	80%	70%	70%	70%
<2	80%	100%	100%	90%	90%	100%
<2,5	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<3	100%	100%	100%	100%	100%	100%
<3,5	100%	100%	100%	100%	100%	100%

*Tabla 8.18.- Resumen de cumplimiento de IRI*

Para el análisis de los resultados de regularidad se debe tener en cuenta los siguientes factores:

- **La influencia de la escasa longitud del tramo a analizar (912 m):** a medida que el número de datos sea mayor, los porcentajes de los valores límite intermedios ( $IRI < 1,5$  y  $1,5 < IRI < 1,8$ ) aumentan y por tanto se adecuan a los límites fijados por el Pliego.
- **Ubicación de los valores pico:** todos los valores que superan el límite establecido ( $IRI < 2$ ) y los valores que provocan que se incumplan el porcentaje intermedio de valores por debajo de 1,8, corresponden al inicio del tramo del pavimento. Como es conocido, usualmente, a medida que el proceso se regulariza los valores se estabilizan y reflejan la tendencia al cumplimiento de los valores de aceptación.
- **Microfresado:** con el objetivo de mejora se realizó un microfresado en las zonas en las que los valores de regularidad excedían los límites, obteniendo un buen resultado del proceso que dio como resultado los valores expuestos en la tabla 8.18.

En condiciones habituales de una obra, los problemas de arranque en la ejecución del pavimento no deberían existir, porque la maquinaria y las dosificaciones en las plantas suministradoras de los hormigones, se ponen a punto durante la ejecución del tramo de prueba obligatorio por el PG-3. Hay que tener presente, que las pequeñas disfunciones se encuentran en el primer tramo una experiencia piloto que, aunque realizada con equipos expertos, implicaba materiales nuevos (áridos diferentes a las experiencias austriacas).

### Control del coeficiente de rozamiento transversal por SCRIM

El artículo 550 del PG-3 no especifica ningún valor exigible para el Coeficiente de Rozamiento Transversal (CRT). Las texturas habituales utilizadas en los pavimentos de hormigón, permiten obtener una resistencia al deslizamiento que cumple holgadamente las especificaciones habituales de otro tipo de pavimentos. En este proyecto de demostración, la textura de árido visto obtenida es asimilable a la de una mezcla bituminosa discontinua para capa de rodadura. Por esta razón, se quiere demostrar que cumple los condicionantes de CRT exigidos a este tipo de mezclas bituminosas.

La determinación de la resistencia al deslizamiento se realiza según las especificaciones de la norma NLT-336/92. En esta norma se describe el procedimiento de medida continuo de la resistencia al rozamiento de superficies húmedas de pavimentos de carreteras. Según esta, **CRT** es la relación entre la reacción transversal originada en la adherencia pavimento-neumático y la reacción vertical del pavimento sobre el neumático.

El resultado medio del ensayo de determinación de la resistencia al deslizamiento no deberá ser en ningún caso inferior a 65 (%) para mezclas bituminosas discontinuas de clase A y no más de un 5% de la longitud total del lote por debajo de 5 puntos (art. 543.PG-3), transcurridos dos meses desde la puesta en servicio al tráfico.

Los resultados obtenidos cada veinte metros por el método SCRIM se resumen en la tabla 8.19.

CRT (Valor medio)	Carril de vehículos lentos	Carril de vehículos rápidos
En % de longitud	77,0	75,6
CRT < 60	0 %	0 %
60 > CRT > 65	0 %	0 %
CRT > 65	100 %	100 %

*Tabla 8.19.- Datos de CRT*

Los valores obtenidos avalan las buenas prestaciones de los pavimentos de hormigón frente a la resistencia al deslizamiento. El valor medio de cada uno de los carriles supera ampliamente el límite fijado por el Pliego, siendo todos los valores obtenidos superiores a 65 (el valor mínimo para el carril de vehículos lentos fue de 66 y para el carril rápido de 67).

### Control de sonoridad del pavimento

La Normativa de carreteras no define límites de referencia ni tampoco metodologías de medida para el nivel sonoro de un pavimento al circular un vehículo

sobre él. En cambio, la normativa austriaca que se ha seguido en este proyecto demostración si define límites asociados a un procedimiento específico de medición.

Los valores que se deben cumplir, según la normativa austriaca (RVS 11066), dependen del tamaño máximo de árido utilizado y la velocidad de circulación del vehículo, según se detalla en la tabla 8.20.

Tamaño máximo de árido	Velocidad de circulación del vehículo	Nivel de sonoridad
8 mm	50 km/h	$\leq 90$ dBA
8 mm	100 km/h	$\leq 101$ dBA
11 mm	100 km/h	$\leq 102$ dBA

*Tabla 8.20.- Nivel de Sonoridad definido en Norma austriaca RVS 11066*

Debido a la imposibilidad de utilizar el procedimiento definido en la normativa austriaca, por no estar disponible en España, se ha encargado a la Fundación CIDAUT unas mediciones del ruido de rodadura por el método de proximidad (CPX) que consiste en mantener un vehículo a una velocidad constante entre 80 y 100 km/h y medir el nivel de presión sonora mediante un sonómetro acoplado a un micrófono en proximidad de una rueda (menos de 1 m).

De acuerdo con Conter (2008), para calcular el nivel de presión sonora que puede ser comparado con los límites establecidos en la RVS 11066, debe restarse 1dBA del valor obtenido en el ensayo CPX. Los resultados corregidos de CPX para los tres tramos en que se ha dividido el proyecto demostración se muestran en la tabla 8.21.

Tramo	Característica	Nivel de sonoridad en dBA	
		80 Km/h	100 Km/h
1	Dentro de túnel 1 (297 m de longitud)	99	103
2	Dentro de túnel 2 (379 m de longitud)	99	103
3	A cielo abierto	99	102

*Tabla 8.21.- Nivel de sonoridad obtenido tras la corrección del CPX*

En la tabla se aprecia que los niveles de ruido medido para el pavimento bicapa en el tramo 1 (a cielo abierto) cumple el requisito establecido en normativa RVS 11066. Por otro lado, los niveles de CPX corregidos en el interior de los túneles (tramos 1 y 2) son 1 dBA mayores que los niveles medidos a cielo abierto, lo que puede deberse a la reverberación sonora que existe en el interior del túnel.







## CAPÍTULO 9

# PLIEGO DE PRESCRIPCIONES TÉCNICAS PARA PAVIMENTO BICAPA DE HORMIGÓN

### 9.1.- DEFINICIÓN

Se define como pavimento de hormigón el constituido por un conjunto de losas de hormigón en masa separadas por juntas transversales, eventualmente dotados de juntas longitudinales; el hormigón se pone en obra con una consistencia tal, que requiere el empleo de vibradores internos para su compactación y maquinaria específica para su extensión y acabado superficial.

La ejecución del pavimento de hormigón incluye las siguientes operaciones:

- Estudio y obtención de la fórmula de trabajo.
- Preparación de la superficie de asiento.
- Fabricación del hormigón.
- Transporte del hormigón.
- Colocación de elementos de guía y acondicionamiento de los caminos de rodadura para la pavimentadora y los equipos de acabado superficial.
- Colocación de los elementos de las juntas.

- Ejecución de juntas en fresco.
- Terminación.
- Numeración y marcado de las losas.
- Protección y curado del hormigón fresco.
- Ejecución de juntas serradas.
- Sellado de las juntas.

## 9.2.- MATERIALES

Lo dispuesto en este artículo se entenderá sin perjuicio de lo establecido en el Real Decreto 1630/1992 (modificado por el Real Decreto 1328/1995), por el que se dictan disposiciones para la libre circulación de productos de construcción, en aplicación de la Directiva 89/106/CEE, y en particular, en lo referente a los procedimientos especiales de reconocimiento se estará a lo establecido en su artículo 9.

Independientemente de lo anterior, se estará además en todo caso, a lo dispuesto en la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad y salud y de almacenamiento y transporte de productos de la construcción.

### 9.2.1.- Cemento

El cemento a utilizar en el pavimento será del tipo II, de acuerdo con la vigente Instrucción para la Recepción de Cementos RC-08. Podrán utilizarse cementos de categoría resistente 32,5 ó 42,5.

El principio de fraguado, según la UNE-EN 196-3, no podrá tener lugar antes de ciento veinte minutos (120 min.). El cemento deberá tener además una finura Blaine no superior a cuatro mil gramos por centímetro cuadrado ( $4000 \text{ cm}^2/\text{g}$ ) y una resistencia a flexotracción a veintiocho días (28 d) igual o superior a siete megapascals (7 MPa).

El contenido máximo en peso de filler calizo del cemento de la capa superior, expresado en proporción del contenido total de componentes principales, no será superior al seis por ciento (6 %).

### 9.2.2.- Agua

El agua deberá cumplir las prescripciones del artículo 280 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

### 9.2.3.- Árido

El árido cumplirá las prescripciones del artículo 610 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes y las prescripciones adicionales

contenidas en este artículo. Para las arenas que no cumplan con la especificación del equivalente de arena, se exigirá que su valor de azul de metileno, según la UNE-EN 933-9, deberá ser inferior a seis (6) para obras sometidas a clases generales de exposición I, IIa o IIb [definidas en la Instrucción de Hormigón Estructural (EHE)] o bien inferior a tres (3) para el resto de los casos.

Los áridos no serán susceptibles de ningún tipo de meteorización o alteración física o química apreciable bajo las condiciones más desfavorables que, presumiblemente, puedan darse en el lugar de empleo. Tampoco podrán dar origen, con el agua, a disoluciones que puedan causar daños a estructuras u otras capas del firme, o contaminar el suelo o las corrientes de agua. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares o, en su defecto, el Director de las Obras deberá fijar los ensayos para determinar la inalterabilidad del material. Si se considera conveniente, para caracterizar los componentes de los áridos que puedan ser lixiviados y que puedan significar un riesgo potencial para el medioambiente o para los elementos de construcción situados en sus proximidades se empleará la NLT-326.

En la capa superior, el tamaño máximo de árido no será superior a once milímetros (11 mm). El árido de la **capa superior** cumplirá las prescripciones adicionales indicadas en la tabla 9.1.

Características	Especificaciones
Fracciones granulométricas: <ul style="list-style-type: none"> <li>Tamaño máximo 8 mm</li> <li>Tamaño máximo 11 mm</li> </ul>	0/1 ó 0/2 y 4/8 0/1 ó 0/2 y 4/8 + 8/11 Alternativamente 0/1 ó 0/2 y 4/11
Coefficiente de forma (UNE-EN 933-4)	> 15 ( $SI_{15}$ )
Granulometría > 4mm	$G_{c90/15}$
Granulometría $\leq 4$ mm <sup>1)</sup> según tabla C.1 de la UNE- EN 12620	$G_{f85}$
Índice de lajas de los áridos de tamaño superior a 4 mm	$IL_{15}$
Contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm, árido grueso (UNE-EN 933-3)	$f_{0,5}$
Contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm, árido fino (UNE-EN 933-3)	$f_{10}$
Porcentaje de caras de fractura del árido grueso (UNE-EN 933-5)	C90/1
Resistencia a la fragmentación del árido grueso (UNE-EN 1097-2)	LA <sub>15</sub> para T00, T0 y T1 LA <sub>20</sub> para T2
Resistencia al pulimento del árido grueso (UNE-EN 1097-8)	CPA <sub>56</sub> para T00 y T0 CPA <sub>50</sub> para T1, T2 y T31

<sup>1)</sup> Solamente podrá mezclarse árido fino de distintas procedencias con aprobación del Director de las Obras

*Tabla 9.1.- Especificaciones del árido usado en la capa superior*

Por su parte, el árido de la **capa inferior** cumplirá las prescripciones adicionales presentadas en la tabla 9.2.

Características	Especificaciones
Fracciones granulométricas:	3 fracciones, de las cuales una tendrá un tamaño máximo de árido de 40 mm y las otras un tamaño mínimo de 4 mm
Coeficiente de forma (UNE-EN 933-4)	$> 40 (SI_{40})$
Granulometría $> 4\text{ mm}$	$G_{C85/20}$
Granulometría $\leq 4\text{ mm}$ <sup>1)</sup> según tabla C.1 de la UNE- EN 12620	$G_{F85}$
Índice de lajas de los áridos de tamaño superior a 4 mm (UNE-EN 933-3)	$IL_{35}$
Contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm, árido grueso (UNE-EN 933-1)	$f_{1,5}$
Contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm, árido fino (UNE-EN 933-1)	$f_{10}$

*Tabla 9.2.- Especificaciones del árido usado en la capa inferior*

No se impone ninguna exigencia en cuanto a la proporción de partículas silíceas del árido fino.

El equivalente de arena del árido fino, según la UNE-EN 933-8, no será inferior a setenta y cinco (75) y a ochenta (80) en zona de heladas en ambas capas.

#### 9.2.4.- Aditivos

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares fijará los aditivos que puedan utilizarse para obtener la trabajabilidad adecuada o mejorar las características de la mezcla. El Director de las Obras establecerá la necesidad de utilizar aditivos y su modo de empleo, de acuerdo con las condiciones de ejecución, las características de la obra y las condiciones climáticas. En cualquier circunstancia, los aditivos utilizados deberán cumplir las condiciones establecidas en la UNE-EN 934-2.

Únicamente se autorizará el uso de aquellos aditivos cuyas características, y especialmente su comportamiento y los efectos sobre la mezcla al emplearlos en las proporciones previstas, vengán garantizadas por el fabricante, siendo obligatorio realizar ensayos previos para comprobar dicho comportamiento.

### 9.2.5.- Pasadores y barras de unión

Los pasadores estarán constituidos por barras lisas de acero, de veinticinco milímetros (25 mm) de diámetro y cincuenta centímetros (50 cm) de longitud, que cumplirán lo establecido en la UNE 36541. El acero será del tipo S-275-JR, definido en la UNE-EN 10025.

Los pasadores estarán recubiertos en toda su longitud con un producto que evite su adherencia al hormigón. Su superficie será lisa y no presentará irregularidades ni rebabas, para lo que sus extremos se cortarán con sierra y no con cizalla. En las juntas de dilatación, uno de sus extremos se protegerá con una caperuza de longitud comprendida entre cincuenta y cien milímetros (50 a 100 mm), rellena de un material compresible que permita un desplazamiento horizontal igual o superior al del material de relleno de la propia junta.

Las barras de unión serán corrugadas, de catorce milímetros (14 mm) de diámetro y ochenta centímetros (70 cm) de longitud, y deberán cumplir las exigencias del artículo 240 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

### 9.2.6.- Membranas para curado del pavimento

Las láminas de plástico para protección del retardador tendrán un espesor igual o superior a diez décimas de milímetro (0,1 mm), una capacidad de retención de agua suficiente para que las pérdidas no sean superiores a cincuenta y cinco gramos por metro cuadrado (0,55 kg/m<sup>2</sup>) después de setenta y dos horas (72 h) y una resistencia a la tracción no inferior a doce megapascals (12 MPa) en sentido longitudinal y a ocho megapascals (8 MPa) en sentido transversal.

El Director de las Obras deberá aprobar los métodos de ensayo para comprobación de dichos requisitos.

### 9.2.7.- Retardadores de fraguado y productos filmógenos de curado

Los productos filmógenos de curado deberán cumplir las prescripciones del artículo 285 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes. Las especificaciones de las características de los productos filmógenos de curado se muestran en la tabla 9.3.



Características	Especificaciones
Retardadores de superficie	Capaces de poder ser extendidos inmediatamente. No deben dañar el hormigón
Productos filmógenos de curado empleados conjuntamente con retardadores de superficie	Capaces de poder ser extendidos inmediatamente. Deben ser compatibles químicamente con el hormigón fresco y el retardador de superficie; deben asegurar una protección de la menos el noventa por ciento (90 %) durante al menos veinticuatro horas (24 h) al ser ensayados conjuntamente con el retardador de superficie
Productos filmógenos de curado empleados después de eliminar el mortero superficial	Deben asegurar una protección de al menos el ochenta y cinco por ciento (85 %)
Productos con efecto combinado de retardador de fraguado y de curado	Deben cumplir las especificaciones de los retardadores de superficie y de los productos filmógenos de curado capaces de poder ser extendidos inmediatamente sobre el hormigón fresco
Con la excepción de los productos filmógenos de curado empleados conjuntamente con retardadores de superficie, los productos incluidos en la tabla anterior no deben perjudicar la resistencia inicial al deslizamiento de los pavimentos de hormigón	

*Tabla 9.3.- Especificaciones de los productos filmógenos de curado*

### 9.2.8.- Materiales para el sellado de juntas

El material utilizado para el sellado de juntas podrán utilizarse los siguientes productos:

- Productos de sellado aplicados en caliente de acuerdo con UNE- EN 14188-1
- Productos de sellado aplicados en frío de acuerdo con UNE- EN 14188-2
- Perfiles preformados de acuerdo con UNE- EN 14188-3

En caso de que alguno de los productos utilizados para el sellado de juntas requiera la aplicación previa de un producto de imprimación, éste deberá cumplir las prescripciones de UNE- EN 14188-4.

Los materiales deberán ser productos sancionados por la práctica y aceptados por el Director de las Obras, quien podrá realizar todos los ensayos y comprobaciones que estime pertinentes para el buen resultado de la operación y su posterior conservación.

### 9.3.- TIPO Y COMPOSICION DEL HORMIGON

La resistencia característica a flexotracción a veintiocho días (28 d), referida a probetas prismáticas de sección cuadrada, de quince centímetros (15 cm) de lado y sesenta centímetros (60 cm) de longitud, fabricadas y conservadas en obra según la UNE – EN 12390-2, admitiéndose su compactación con mesa vibrante, ensayadas según la UNE – EN 12390-5, pertenecerá a uno de los tipos indicados a continuación y estará especificada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

La resistencia característica a flexotracción del hormigón a veintiocho días (28 d) se define como el valor de la resistencia asociado a un nivel de confianza del noventa y cinco por ciento (95%).

En la capa superior del pavimento se dispondrá un hormigón con una resistencia característica a flexotracción a veintiocho días (28 d) no inferior a cinco coma cero megapascals (5,0 MPa).

En la capa inferior del pavimento se dispondrá un hormigón con una resistencia característica a flexotracción a veintiocho días (28 d) no inferior a cuatro coma cinco megapascals (4,5 MPa).

La consistencia del hormigón se medirá la UNE-EN 12350-2, debiendo el asiento estar comprendido entre cero y dos centímetros (0 y 2 cm).

En el hormigón de la capa inferior la masa unitaria del total de partículas cernidas por el tamiz 0,125 mm de la UNE-EN 933-2, incluyendo el cemento, no será mayor de cuatrocientos cincuenta kilogramos por metro cúbico (450 kg/m<sup>3</sup>) de hormigón fresco. En el hormigón de la capa superior no se imponen limitaciones a este respecto.

La dosificación de cemento no será inferior a cuatrocientos cincuenta kilogramos por metro cúbico (450 kg/m<sup>3</sup>) de hormigón fresco en la capa superior, ni a trescientos kilogramos por metro cúbico (300 kg/m<sup>3</sup>) de hormigón fresco en la capa inferior, En esta última la relación ponderal agua/cemento (a/c) no será superior a cuarenta y seis centésimas (0,46).

Será obligatoria la utilización de un inclusor de aire en ambas capas. La proporción de aire ocluido en el hormigón fresco de cada una de las capas vertido en obra, según la UNE-EN 12350-7, estará comprendida entre el cuatro por ciento (4,0%) y el seis por ciento (6%) en volumen.

## 9.4.- EQUIPO NECESARIO PARA LA EJECUCION DE LAS OBRAS

Se estará, en todo caso, a lo dispuesto en la legislación vigente en materia ambiental, de seguridad y salud y de transporte en lo referente a los equipos empleados en la ejecución de las obras.

### 9.4.1.- Central de fabricación

Al utilizarse dos (2) tipos de hormigón de dosificaciones y tipo de áridos diferentes de manera simultánea, se deberán disponer de dos centrales independientes o una central con dos amasadoras y doble dispositivo de tolvas para áridos.

La capacidad mínima de acopio de cemento corresponderá al consumo de una jornada y media (1,5) a rendimiento normal, salvo que la distancia al punto de aprovisionamiento fuera inferior a cien kilómetros (100 km), en cuyo caso el límite se podrá rebajar a una (1) jornada, previa autorización del Director de las Obras.

El hormigón se fabricará en centrales de mezcla discontinua, capaces de manejar, simultáneamente, el número de fracciones del árido que exija la fórmula de trabajo adoptada. La producción horaria de la central de fabricación deberá ser capaz de suministrar el hormigón sin que la alimentación de la pavimentadora se interrumpa y, en cualquier caso, no podrá ser inferior a la correspondiente a una velocidad de avance de la pavimentadora de cuarenta metros por hora (40 m/h).

En pavimentos para carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T1, la central de fabricación estará dotada de un higrómetro dosificador de agua y de un sistema de registro y, en su caso, con visualización de la potencia absorbida por los motores de accionamiento de los mezcladores, y de las pesadas en los áridos, cemento, agua y eventuales aditivos.

Las tolvas para áridos deberán tener paredes resistentes y estancas, bocas de anchura suficiente para que su alimentación se efectúe correctamente, y estarán provistas de dispositivos para evitar intercontaminaciones; su número mínimo será función del número de fracciones de árido que exija la fórmula de trabajo adoptada.

Para el cemento a granel se utilizará una báscula independiente de la utilizada para los áridos. El mecanismo de carga estará enclavado contra un eventual cierre antes de que la tolva de pesada estuviera adecuadamente cargada. El de descarga contra una eventual apertura antes de que la carga del cemento en la tolva de pesada hubiera finalizado, y de que la masa del cemento en ella difiriera en menos del uno por ciento ( $\pm 1\%$ ) de la especificada; además estará diseñado de forma que permita la regulación de la salida del cemento sobre los áridos.

La dosificación de los áridos se podrá efectuar por pesadas acumuladas en una (1) sola tolva o individualmente con una (1) tolva de pesada independiente para cada fracción.

En el primer caso, las descargas de las tolvas de alimentación y la descarga de la tolva de pesada estarán enclavadas entre sí, de forma que:

- No podrá descargar más de un (1) silo al mismo tiempo.
- El orden de descarga no podrá ser distinto al previsto.
- La tolva de pesada no se podrá descargar hasta que haya sido depositada en ella la cantidad requerida de cada uno de los áridos, y estén cerradas todas las descargas de las tolvas.
- La descarga de la tolva de pesada deberá estar enclavada contra una eventual apertura antes de que la masa de árido en la tolva, difiera en menos de un uno por ciento ( $\pm 1\%$ ) del acumulado de cada fracción.

Si se utilizasen tolvas de pesada independientes para cada fracción, todas ellas deberán poder ser descargadas simultáneamente. La descarga de cada tolva de pesada deberá estar enclavada contra una eventual apertura antes de que la masa de árido en ella difiera en menos de un dos por ciento ( $\pm 2\%$ ) de la especificada.

El enclavamiento no permitirá que se descargue parte alguna de la dosificación, hasta que todas las tolvas de los áridos y la del cemento estuvieran correctamente cargadas, dentro de los límites especificados. Una vez comenzada la descarga, quedarán enclavados los dispositivos de dosificación, de tal forma que no se pueda comenzar una nueva dosificación hasta que las tolvas de pesada estén vacías, sus compuertas de descarga cerradas y los indicadores de masa de las balanzas a cero, con una tolerancia del tres por mil ( $\pm 0,3\%$ ) de su capacidad total.

Los dosificadores ponderales deberán estar aislados de vibraciones y de movimientos de otros equipos de la central, de forma que, cuando ésta funcione, sus lecturas, después de paradas las agujas, no difieran de la masa designada en más del uno por ciento ( $\pm 1\%$ ) para el cemento, uno y medio por ciento ( $\pm 1,5\%$ ) para cada fracción del árido o uno por ciento ( $\pm 1\%$ ) para el total de las fracciones si la masa de éstas se determinase conjuntamente. Su precisión no deberá ser inferior al cinco por mil ( $\pm 0,5\%$ ) para los áridos, ni al tres por mil ( $\pm 0,3\%$ ) para el cemento. El agua añadida se medirá en masa o volumen, con una precisión no inferior al uno por ciento ( $\pm 1\%$ ) de la cantidad total requerida.

Una vez fijadas las proporciones de los componentes la única operación manual que se podrá efectuar para dosificar los áridos y el cemento de una amasada será la de accionamiento de interruptores o conmutadores. Los mandos del dosificador deberán estar en un compartimento fácilmente accesible, que pueda ser cerrado con llave cuando así se requiera.

Si se prevé la incorporación de aditivos a la mezcla, la central deberá poder dosificarlos con precisión suficiente, a juicio del Director de las Obras. Los aditivos en polvo se dosificarán en masa y los aditivos en forma de líquido o de pasta en masa o en volumen, con una precisión no inferior al tres por ciento ( $\pm 3\%$ ) de la cantidad especificada de producto.

El temporizador del amasado y el de la descarga del mezclador deberán estar enclavados de tal forma que, durante el funcionamiento del mezclador, no se pueda producir la descarga hasta que haya transcurrido el tiempo de amasado previsto.

#### **9.4.2.- Elementos de transporte**

El transporte del hormigón fresco, desde la central de fabricación hasta el equipo de extensión, se realizará con camiones sin elementos de agitación, de forma que se impida toda segregación, exudación, evaporación de agua o intrusión de cuerpos extraños en aquél. Su caja deberá ser lisa y estanca, y estar perfectamente limpia, para lo cual se deberá disponer de un equipo adecuado. Estos camiones deberán siempre estar provistos de una lona o cobertor para proteger el hormigón fresco durante su transporte evitando la excesiva evaporación del agua o la intrusión de elementos extraños.

Deberán disponerse los equipos necesarios para la limpieza de los elementos de transporte antes de recibir una nueva carga de hormigón.

La producción horaria del equipo de transporte deberá ser capaz de suministrar el hormigón sin que la alimentación de la pavimentadora se interrumpa a la velocidad de avance aprobada por el Director de las Obras, considerada como mínimo de cuarenta metros por hora (40 m/h).

#### **9.4.3.- Equipos de puesta en obra del hormigón: Pavimentadoras de encofrados deslizantes**

El equipo de puesta en obra del hormigón estará integrado como mínimo por las siguientes máquinas:

- Un equipo para el reparto previo del hormigón fresco, con un espesor uniforme y a toda la anchura de pavimentación. En pavimentos de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T2, se empleará una extendedora.
- Una pavimentadora de encofrados deslizantes por cada capa de construcción, capaz de extender, vibrar y enrasar uniformemente el hormigón fresco. La que se emplee en la capa superior deberá realizar, además, un fratasado de forma que se obtenga mecánicamente una terminación regular y homogénea, que no necesite retoques manuales como por ejemplo denudado químico.

La pavimentadora deberá estar equipada con un sistema de guía por cable, debiendo actuar los servomecanismos correctores apenas las desviaciones de la

pavimentadora rebasen tres milímetros (3 mm) en alzado, o diez milímetros (10 mm) en planta.

La pavimentadora estará dotada de encofrados móviles de dimensiones, forma y resistencia suficientes para sostener el hormigón lateralmente durante el tiempo necesario para obtener la sección transversal prevista, sin asiento del borde de la losa. Tendrá los dispositivos adecuados acoplados para mantener limpios los caminos de rodadura del conjunto de los equipos de extensión y terminación.

La pavimentadora deberá poder compactar adecuadamente el hormigón fresco en toda la anchura del pavimento, mediante vibración interna aplicada por elementos cuya separación estará comprendida entre cuarenta y sesenta centímetros (40 a 60 cm), medidos entre sus centros. La separación entre el centro del vibrador extremo y la cara interna del encofrado correspondiente no excederá de quince centímetros (15 cm). La frecuencia de cada vibrador no será inferior a ochenta hertzios (80 Hz), y la amplitud será suficiente para ser perceptible en la superficie del hormigón fresco a una distancia de treinta centímetros (30 cm).

Los elementos vibratorios de las máquinas no se deberán apoyar sobre pavimentos terminados, y dejarán de funcionar en el instante en que éstas se detengan.

La longitud de la maestra enrasadora de la pavimentadora deberá ser suficiente para que no se aprecien ondulaciones en la superficie del hormigón extendido.

Si los pasadores o las barras de unión se insertan en el hormigón fresco por vibración, el equipo de inserción no requerirá que la pavimentadora se detenga y, para los pasadores, deberá estar dotado de un dispositivo que señale automáticamente su posición, a fin de garantizar que las juntas queden centradas en ellos con una tolerancia máxima de cincuenta milímetros (50 mm) respecto de la posición real.

En pavimentos de carreteras con categorías de tráfico pesado T00 a T2, la pavimentadora para el hormigón extendido en una capa, o para la capa superior si se extiende en dos capas, estará dotada de un fratas mecánico longitudinal oscilante. Antes de la ejecución de la textura superficial, se arrastrará una arpillera mojada y lastrada a toda la anchura de la pavimentación, hasta borrar las huellas dejadas por el fratas.

Previa autorización del Director de las Obras podrán utilizarse pavimentadoras que extiendan las dos capas simultáneamente.

#### 9.4.4.- Sierras

Las sierras para la ejecución de juntas en el hormigón endurecido deberán tener una potencia mínima de dieciocho caballos (18 CV) y su número deberá ser suficiente para seguir el ritmo de hormigonado sin retrasarse, debiendo haber siempre al menos una (1) de reserva. El número necesario de sierras se determinará mediante ensayos de velocidad

de corte del hormigón en el tramo de prueba. El tipo de disco deberá ser aprobado por el Director de las Obras.

Las sierras para juntas longitudinales deberán estar dotadas de una guía de referencia para asegurar que la distancia a los bordes del pavimento se mantiene constante.

#### **9.4.5.- Distribuidores de retardador de fraguado y de productos filmógenos de curado**

Los pulverizadores de retardadores de fraguado y de productos filmógenos de curado sobre el hormigón fresco deberán asegurar un reparto continuo y uniforme en toda la anchura de la losa, e ir provistos de dispositivos que proporcionen una adecuada protección del producto pulverizado contra el viento y de otros mecánicos en los tanques de almacenamiento de los productos, que los mantengan en continua agitación durante su aplicación. Los pulverizadores de productos de curado sobre el hormigón fresco también deberán ser capaces de aplicar los mismos en los costados descubiertos de las losas.

Para la aplicación del producto de curado sobre el hormigón endurecido una vez eliminado el mortero superficial, podrán utilizarse equipos mecanizados de ancho más reducido, los cuales deberán ser autorizados por el Director de las Obras.

En zonas pequeñas, irregulares o inaccesibles a dispositivos mecánicos, el Director de las Obras podrá autorizar el empleo de pulverizadores manuales.

#### **9.4.6.- Equipos para eliminación del mortero superficial**

Los equipos para eliminación del mortero superficial deberán ser aprobados previamente por el Director de las Obras. En el caso de emplearse una barredora, cada uno de los elementos de barrido debe estar situado entre los ejes del equipo portante y rebasar por cada lado al menos treinta centímetros (30 cm) los bordes exteriores de los neumáticos de este último. Por otra parte, debe poder ser regulado tanto en altura como en inclinación con respecto al eje de la calzada. El Director de las Obras podrá exigir que la barredora esté provista de aspersores.

### **9.5.- EJECUCION DE LAS OBRAS**

#### **9.5.1.- Estudio y obtención de la fórmula de trabajo**

La producción de los distintos hormigones no se podrá iniciar en tanto que el Director de las Obras no haya aprobado la correspondiente fórmula de trabajo de cada uno de ellos, estudiada en el laboratorio y verificada en la central de fabricación y en el tramo de prueba, la cual deberá señalar, como mínimo:



- La identificación y proporción ponderal en seco de cada fracción del árido en la amasada.
- La granulometría de los áridos combinados por los tamices 40 mm; 25 mm; 20 mm; 12,5 mm (11 mm en caso de ser éste el tamaño máximo de árido); 8 mm; 4 mm; 2 mm; 1 mm; 0,500 mm; 0,250 mm; 0,125 mm y 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.
- La dosificación de cemento, la de agua y, eventualmente, la de cada aditivo, referidas a la amasada (en masa o en volumen según corresponda).
- La resistencia media, medida como el promedio de tres (3) probetas, a tracción indirecta a dos (2) y veintiocho días (28 d).
- La consistencia del hormigón fresco y el contenido de aire.
- La consistencia del hormigón fresco y el contenido de aire ocluido.

Será preceptiva la realización de ensayos de resistencia a tracción indirecta para cada fórmula de trabajo, con objeto de comprobar que los materiales y medios disponibles en obra permiten obtener un hormigón con las características exigidas. Los ensayos de resistencia se llevarán a cabo sobre probetas procedentes de seis (6) amasadas diferentes, confeccionando dos (2) series de tres (3) probetas por amasada, según la UNE 83301, admitiéndose para ello el empleo de una mesa vibrante. Dichas probetas se conservarán en las condiciones previstas en la citada norma, para ensayar a tracción indirecta, según la UNE 83305, una (1) serie de cada una de las amasadas a dos días (2 d) y la otra a veintiocho días (28 d).

La resistencia de cada amasada a una cierta edad se determinará como media de las probetas confeccionadas con hormigón de dicha amasada y ensayadas a dicha edad.

Si la marcha de las obras lo aconsejase, el Director de las mismas podrá exigir la corrección de la fórmula de trabajo, que se justificará mediante los ensayos oportunos. En todo caso, se estudiará y aprobará una nueva fórmula siempre que varíe la procedencia de alguno de los componentes, o si, durante la producción, se rebasasen las tolerancias establecidas en este artículo.

#### **9.5.2.- Preparación de la superficie de apoyo**

El pavimento de hormigón se apoyará directamente sobre la superficie de la capa de mezcla bituminosa.

Se prohibirá circular sobre la superficie preparada, salvo al personal y equipos que sean imprescindibles para la ejecución del pavimento. En este caso, se tomarán todas las precauciones que exigiera el Director de las Obras, cuya autorización será preceptiva.

En época seca y calurosa, y siempre que sea previsible una pérdida de humedad del hormigón, el Director de las Obras podrá exigir que la superficie de apoyo se riegue

ligeramente con agua, inmediatamente antes de la extensión, de forma que ésta quede húmeda pero no encharcada, eliminándose las acumulaciones que hubieran podido formarse.

### 9.5.3.- Fabricación del hormigón

#### Acopio de áridos

Los áridos se producirán o suministrarán en fracciones granulométricas diferenciadas, que se acopiarán y manejarán por separado hasta su introducción en las tolvas de áridos. Cada fracción será suficientemente homogénea y se deberá poder acopiar y manejar sin peligro de segregación, observando las precauciones que se detallan a continuación.

El número de fracciones no podrá ser inferior a tres (3), salvo en la capa de rodadura. El Director de las Obras podrá exigir un mayor número de fracciones, si lo estimara necesario para mantener la composición y características del hormigón.

Cada fracción del árido se acopiará separada de las demás para evitar que se produzcan contaminaciones entre ellas. Si los acopios se fueran a disponer sobre el terreno natural, se drenará la plataforma y no se utilizarán los quince centímetros (15 cm) inferiores de los mismos, a no ser que se pavimente la zona de acopio. Los acopios se construirán por capas de espesor no superior a un metro y medio (1,5 m), y no por montones cónicos. Las cargas del material se colocarán adyacentes, tomando las medidas oportunas para evitar su segregación.

Cuando se detecten anomalías en el suministro de los áridos, se acopiarán por separado hasta confirmar su aceptación; esta misma medida se aplicará cuando se autorice el cambio de procedencia de un árido. No se emplearán métodos de transporte desde los acopios a las tolvas de la central que pudieran causar segregación, degradación o mezcla de fracciones de distintos tamaños.

El volumen mínimo de acopios antes de iniciar la producción de la mezcla no deberá ser inferior al cincuenta por ciento (50%) en carreteras con categoría de tráfico pesado T00 a T2.

#### Suministro y acopio de cemento

El cemento se suministrará y acopiará de acuerdo con el artículo 202 de este Pliego. La masa mínima de cemento acopiado en todo momento no deberá ser inferior a la necesaria para la fabricación del hormigón durante una jornada y media (1,5) a rendimiento normal. El Director de las Obras podrá autorizar la reducción de este límite a una (1) jornada, si la distancia entre la central de hormigonado y la fábrica de cemento fuera inferior a cien kilómetros (100 km).

### Acopio de aditivos, retardadores de superficie y productos de curado

Los aditivos, retardadores de superficie y productos de curado se protegerán convenientemente de la intemperie y de toda contaminación; los sacos de productos en polvo se almacenarán en sitio ventilado y defendido, tanto de la intemperie como de la humedad del suelo y de las paredes. Los productos suministrados en forma líquida, y los pulverulentos diluidos en agua, se almacenarán en depósitos estancos y protegidos de las heladas, equipados de elementos agitadores para mantener los sólidos en suspensión.

### Amasado del hormigón

La carga de cada una de las tolvas de áridos se realizará de forma que el contenido esté siempre comprendido entre el cincuenta y el cien por ciento (50 a 100%) de su capacidad, sin rebosar. En las operaciones de carga se tomarán las precauciones necesarias para evitar segregaciones o contaminaciones. La alimentación del árido fino, aun cuando ésta fuera de un (1) único tipo y granulometría, se efectuará dividiendo la carga entre dos (2) tolvas.

El amasado se realizará mediante dispositivos capaces de asegurar la completa homogeneización de todos los componentes. La cantidad de agua añadida a la mezcla será la necesaria para alcanzar la relación agua/cemento fijada por la fórmula de trabajo; para ello, se tendrá en cuenta el agua aportada por la humedad de los áridos, especialmente del árido fino.

Los aditivos en forma líquida o en pasta se añadirán al agua de amasado, mientras que los aditivos en polvo se deberán introducir en el mezclador junto con el cemento o los áridos.

A la descarga del mezclador todo el árido deberá estar uniformemente distribuido en el hormigón fresco, y todas sus partículas total y homogéneamente cubiertas de pasta de cemento. Los tiempos de mezcla y amasado necesarios para lograr una mezcla homogénea y uniforme, sin segregación, así como la temperatura máxima del hormigón al salir del mezclador serán fijados durante la realización del tramo de prueba especificado en el apartado 550.6 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes. Si se utilizase hielo para enfriar el hormigón, la descarga no comenzará hasta que se hubiera fundido en su totalidad, y se tendrá en cuenta para la relación agua/cemento (a/c).

Antes de volver a cargar el mezclador, se vaciará totalmente su contenido. Si hubiera estado parado más de treinta minutos (30 min), se limpiará perfectamente antes de volver a verter materiales en él. De la misma manera se procederá, antes de comenzar la fabricación de hormigón con un nuevo tipo de cemento. El Director de las Obras podrá autorizar el empleo de hormigón preparado y su transporte en camiones-hormigonera exclusivamente para arcenes y superficies de pavimentación muy reducidas.

#### 9.5.4.- Transporte del hormigón

El transporte del hormigón fresco desde la central de fabricación hasta su puesta en obra se realizará tan rápidamente como sea posible. No se mezclarán masas frescas fabricadas con distintos tipos de cemento. El hormigón transportado en vehículo abierto se protegerá con cobertores contra la lluvia o la desecación.

La máxima caída libre vertical del hormigón fresco en cualquier punto de su recorrido no excederá de un metro y medio (1,5 m) y, si la descarga se hiciera al suelo, se procurará que se realice lo más cerca posible de su ubicación definitiva, reduciendo al mínimo posteriores manipulaciones.

#### 9.5.5.- Elementos de guía y acondicionamiento de los caminos de rodadura para pavimentadoras de encofrados deslizantes

La distancia entre piquetes que sostengan el cable de guiado de las pavimentadoras de encofrados deslizantes no podrá ser superior a diez metros (10 m); dicha distancia se reducirá a cinco metros (5 m) en curvas de radio inferior a quinientos metros (500 m) y en acuerdos verticales de parámetro inferior a dos mil metros (2.000 m). Se tensará el cable de forma que su flecha entre dos piquetes consecutivos no sea superior a un milímetro (1 mm).

Donde se hormigone una franja junto a otra existente, se podrá usar ésta como guía de las máquinas. En este caso, deberá haber alcanzado una edad mínima de tres días (3 d) y se protegerá la superficie de la acción de las orugas interponiendo bandas de goma, chapas metálicas u otros materiales adecuados, a una distancia conveniente del borde. Si se observan daños estructurales o superficiales en los caminos de rodadura, se suspenderá el hormigonado, reanudándolo cuando aquél hubiera adquirido la resistencia necesaria, o adoptando precauciones suficientes para que no se vuelvan a producir daños.

Los caminos de rodadura de las orugas estarán suficientemente compactados para permitir su paso sin deformaciones, y se mantendrán limpios. No deberán presentar irregularidades superiores a quince milímetros (15 mm).

#### 9.5.6.- Colocación de los elementos de las juntas

Los pasadores se dispondrán en planta cada veinticinco centímetros (25 cm) en la zona de rodada y respecto a los bordes de las juntas longitudinales. En el resto, cada cincuenta centímetros (50 cm) aproximadamente.

Los pasadores se colocarán paralelos entre sí y al eje de la calzada. La máxima desviación, tanto en planta como en alzado, de la posición del eje de un pasador respecto a la teórica será de veinte milímetros (20 mm). La máxima desviación angular respecto a la

dirección teórica del eje de cada pasador, medida por la posición de sus extremos, será de diez milímetros (10 mm) si se insertan por vibración.

Se colocarán tres (3) barras de unión por losa, una de ellas en el centro y las otras dos (2) separadas una como cinco metros (1,5) como máximo. Las barras de unión deberán quedar colocadas a dos tercios (2/3) del espesor total de la losa.

#### 9.5.7.- Puesta en obra del hormigón

La puesta en obra del hormigón se realizará con pavimentadoras de encofrados deslizantes. La descarga y la extensión previa del hormigón en toda la anchura de pavimentación se realizarán de modo suficientemente uniforme para no desequilibrar el avance de la pavimentadora; esta precaución se deberá extremar al hormigonar en rampa.

Se cuidará que delante de la maestra enrasadora se mantenga en todo momento, y en toda la anchura de pavimentación, un volumen suficiente de hormigón fresco en forma de cordón de unos diez centímetros (10 cm) como máximo de altura; delante de los frateses de acabado se mantendrá un cordón continuo de mortero fresco, de la menor altura posible.

Donde la calzada tuviera dos (2) o más carriles en el mismo sentido de circulación, se hormigonarán al menos dos (2) carriles al mismo tiempo, salvo indicación expresa en contrario, del Director de las Obras. Por otro lado, se dispondrán pasarelas móviles con objeto de facilitar la circulación del personal y evitar daños al hormigón fresco, y los tajos de hormigonado deberán tener todos sus accesos bien señalizados y acondicionados para proteger el pavimento recién construido.

Donde el Director de las Obras autorizase la extensión y compactación del hormigón por medios manuales, se mantendrá siempre un volumen suficiente de hormigón delante de la regla vibrante, y se continuará compactando hasta que se haya conseguido la forma prevista y el mortero refluya ligeramente a la superficie.

Entre la extensión de la capa superior y la inferior del pavimento no deberán transcurrir más de treinta minutos (30 min.). Asimismo deberá evitarse que, como consecuencia de una puesta en obra inadecuada, se produzca dentro del pavimento una mezcla de los hormigones de las dos capas. Por último se adoptarán las medidas necesarias para impedir que se produzca un exceso de mortero fino en la superficie de la cara superior.

#### 9.5.8.- Terminación

##### Generalidades

Se prohibirá el riego con agua o la extensión de mortero sobre la superficie del hormigón fresco para facilitar su acabado. Donde fuera necesario aportar material para

corregir una zona baja, se empleará hormigón aún no extendido. En todo caso, se eliminará la lechada de la superficie del hormigón fresco.

#### Terminación con pavimentadoras de encofrados deslizantes

La superficie del pavimento no deberá ser retocada, salvo en zonas aisladas, comprobadas con reglas de longitud no inferior a cuatro metros (4 m). En este caso el Director de las Obras podrá autorizar un fratasado manual, en la forma indicada en el apartado 550.4.3.2 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

#### Terminación de los bordes

Terminadas las operaciones de fratasado descritas en el apartado anterior, y mientras el hormigón esté todavía fresco, se redondearán cuidadosamente los bordes de las losas con una llana curva de doce milímetros (12 mm) de radio.

#### Textura superficial

La textura del pavimento se obtendrá por denudación química de la superficie del hormigón fresco, obtenida mediante la aplicación de un retardador de fraguado y la posterior eliminación del mortero no fraguado.

La aplicación del retardador de fraguado tendrá lugar antes de transcurridos treinta minutos (30 min.) de la puesta en obra de la capa superior del pavimento.

La dotación de retardador de fraguado se determinará mediante ensayos previos, de forma que se obtenga una profundidad de textura, determinada por el método del círculo de arena, según la UNE-EN 13036-1, deberá estar comprendida entre ochenta centésimas de milímetro (0,80 mm) y cien centésimas de milímetro (1,0 mm) si el tamaño máximo del árido de la capa superior es igual a ocho milímetros (8 mm) ; y entre cien centésimas de milímetro (1,00 mm) y ciento treinta centésimas de milímetro (1,3 mm) si dicho tamaño máximo es igual a once milímetros (11 mm).

La eliminación del mortero superficial se realizará antes de transcurridas veinticuatro horas (24 h), salvo que el fraguado insuficiente del hormigón requiera alargar este período. Dicha eliminación se llevará a cabo mediante el paso de una barredora mecánica provista en caso necesario de aspersores para evitar la formación de polvo. También podrán emplearse con dicho fin equipos de agua a presión. El Director de las Obras deberá aprobar el método de eliminación del mortero.

#### **9.5.9.- Numeración y marcado de las losas**

Una vez dada la textura al pavimento, las losas exteriores de la calzada se numerarán con tres (3) dígitos, aplicando una plantilla al hormigón fresco. El marcado

tendrá una profundidad mínima de cinco milímetros (5 mm), con cifras de diez centímetros (10 cm) de altura y a una distancia de treinta centímetros (30 cm) del borde o junta longitudinal y de la junta transversal. Cuando se emplee el denudado, se tomarán medidas para evitar este en las zonas de marcado.

Se numerará al menos una (1) losa de cada dos (2), en sentido de avance de la pavimentadora, volviendo a comenzarse la numeración en cada hito kilométrico.

Se marcará el día de hormigonado en la primera losa ejecutada ese día. En los pavimentos continuos de hormigón armado, se marcará el día en los dos extremos de la losa.

#### **9.5.10.- Protección y curado del hormigón fresco**

##### **Generalidades**

Durante el primer período de endurecimiento, se protegerá el hormigón fresco contra el lavado por lluvia, contra la desecación rápida, especialmente en condiciones de baja humedad relativa del aire, fuerte insolación o viento y contra enfriamientos bruscos o congelación.

Si el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o en su defecto el Director de las Obras, lo exige, se colocará una tienda sobre las máquinas de puesta en obra o un tren de tejadillos bajos de color claro, cerrados y móviles, que cubran una longitud de pavimento igual, al menos, a cincuenta metros (50 m). Alternativamente, el Director de las Obras podrá autorizar la utilización de una lámina de plástico o un producto de curado resistente a la lluvia.

El hormigón se curará con un producto filmógeno durante el plazo que fije el Director de las Obras, salvo que éste autorice el empleo de otro sistema. Deberán someterse a curado todas las superficies expuestas de la losa, incluidos sus bordes, apenas queden libres.

Durante un período que, salvo autorización expresa del Director de las Obras, no será inferior a tres días (3 d) a partir de la puesta en obra del hormigón, estará prohibido todo tipo de circulación sobre el pavimento recién ejecutado, con excepción de la imprescindible para aserrar juntas y comprobar la regularidad superficial.

##### **Curado con productos filmógenos**

El retardador de fraguado se protegerá mediante un producto de curado que pueda aplicarse sobre el hormigón fresco, o bien extendiendo por medios mecánicos una membrana impermeable de plástico, que se mantendrá hasta la eliminación del mortero. El Director de las Obras deberá aprobar el método que se utilice, así como el equipo empleado para la extensión de la lámina de plástico en caso de que se utilice esta última. Si



se aplica un producto de curado, la dotación deberá ser aprobada por el Director de las Obras, no pudiendo ser inferior a ciento ochenta gramos por metro cuadrado ( $180 \text{ g/m}^2$ ).

Las láminas de plástico se colocarán con solapes no inferiores a quince centímetros (15 cm). El solape tendrá en cuenta la pendiente longitudinal y transversal, para asegurar la impermeabilidad del recubrimiento. Las láminas se dispondrán de forma que cubran también los bordes verticales de las losas.

Inmediatamente después de eliminado el mortero se extenderá un producto filmógeno de curado en toda la superficie del pavimento, por medios mecánicos que aseguren una pulverización del producto en un rocío fino, de forma continua y uniforme, con la dotación aprobada por el Director de las Obras, que no podrá ser inferior a ciento ochenta gramos por metro cuadrado ( $180 \text{ g/m}^2$ ).

En los arcenes de hormigón, una vez creada la textura se extenderá un producto filmógeno que pueda ser aplicado sobre el hormigón fresco, con una dotación mínima de ciento ochenta gramos por metro cuadrado ( $180 \text{ g/m}^2$ ); o bien se cubrirá con la misma lámina de plástico utilizada en la calzada en el caso de que se emplee este método y el arcén se construya simultáneamente con la calzada. Una vez retirada la lámina, se extenderá sobre el arcén un producto filmógeno con la misma dotación y características que el de la calzada.

Se volverá a aplicar producto de curado sobre los labios de las juntas recién serradas y sobre las zonas mal cubiertas o donde, por cualquier circunstancia, la película formada se haya estropeado durante el período de curado.

En condiciones ambientales adversas de baja humedad relativa, altas temperaturas, fuertes vientos o lluvia, el Director de las Obras podrá exigir que el producto de curado se aplique antes y con mayor dotación.

#### **9.5.11.- Ejecución de juntas serradas**

En juntas transversales, el hormigón endurecido se serrará de forma y en instante tales, que el borde de la ranura sea limpio y no se hayan producido anteriormente grietas de retracción en su superficie. En todo caso el serrado tendrá lugar antes de transcurridas veinticuatro horas (24 h) desde la puesta en obra.

Las juntas longitudinales se podrán serrar en cualquier momento después de transcurridas veinticuatro horas (24 h), y antes de las setenta y dos horas (72 h) desde la terminación del pavimento, siempre que se asegure que no habrá circulación alguna, ni siquiera la de obra, hasta que se haya hecho esta operación. No obstante, cuando se espere un descenso de la temperatura ambiente de más de quince grados Celsius ( $15^\circ \text{C}$ ) entre el día y la noche, las juntas longitudinales se serrarán al mismo tiempo que las transversales.

Si el sellado de las juntas lo requiere, y con la aprobación del Director de las Obras, el serrado se podrá realizar en dos (2) fases: la primera hasta la profundidad definida en los Planos, y practicando, en la segunda, un ensanche en la parte superior de la ranura para poder introducir el producto de sellado.

Si a causa de un serrado prematuro se astillaran los labios de las juntas, se repararán con un mortero de resina epoxi aprobado por el Director de las Obras.

Hasta el sellado de las juntas, o hasta la apertura del pavimento a la circulación si no se fueran a sellar, aquéllas se obturarán provisionalmente con cordeles u otros elementos similares, de forma que se evite la introducción de cuerpos extraños en ellas.

#### **9.5.12.- Sellado de las juntas**

Terminado el período de curado del hormigón y si está previsto el sellado de las juntas, se limpiarán enérgica y cuidadosamente el fondo y los labios de la ranura, utilizando para ello un cepillo giratorio de púas metálicas, discos de diamante u otro procedimiento que no produzca daños en la junta, y dando una pasada final con aire comprimido. Finalizada esta operación, se imprimirán los labios con un producto adecuado, si el tipo de material de sellado lo requiere.

Posteriormente se colocará el material de sellado previsto en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.

Se cuidará especialmente la limpieza de la operación, y se recogerá cualquier sobrante de material. El material de sellado deberá quedar conforme a los Planos.

### **9.6.- ESPECIFICACIONES DE LA UNIDAD TERMINADA**

#### **9.6.1.- Resistencia**

La resistencia a flexotracción a veintiocho días (28 d) cumplirá lo indicado en el apartado 3.

#### **9.6.2.- Alineación, rasante, espesor y anchura**

Las desviaciones en planta respecto a la alineación teórica, no deberán ser superiores a tres centímetros (3 cm), y la superficie de la capa deberá tener las pendientes indicadas en los planos.

La rasante de la superficie acabada no deberá quedar por debajo de la teórica, en más de diez milímetros (10 mm), ni rebasar a ésta en ningún punto.

El espesor del pavimento no podrá ser inferior en cinco milímetros (5 mm) al previsto en los Planos de secciones tipo, medido por el promedio de tres (3) testigos del pavimento.

En todos los perfiles se comprobará la anchura del pavimento, que en ningún caso podrá ser inferior a la teórica deducida de la sección tipo de los Planos.

### 9.6.3.- Regularidad superficial

El Índice de Regularidad Internacional (IRI), según la NLT-330, no superará los valores indicados en la tabla 9.4.

Porcentaje de hectómetros	Tipo de vía	
	Calzadas de autopistas y autovías	Resto de vías
50	< 1,5	< 1,5
80	< 1,8	< 2,0
100	< 2,0	< 2,5

Tabla 9.4.- Índice de regularidad internacional (IRI) (dm/hm)

### 9.6.4.- Textura superficial

La profundidad media de la textura, determinada por el método del círculo de arena, según la UNE-EN 13036-1, deberá ser mayor de setenta centésimas de milímetro (0,70 mm).

### 9.6.5.- Resistencia al deslizamiento

El Coeficiente de rozamiento transversal (CRT) medio, medido según la NLT-336, se valorará en función de los valores a los dos meses de la puesta en servicio y debe ser superior a sesenta y cinco por ciento (65 %).

### 9.6.6.- Integridad

El número de losas fisuradas debe ser menor del dos por ciento (<2%) con fisuras de anchura mayor de un milímetro (1 mm) a distancia mayor de un metro (1 m).

## 9.7.- LIMITACIONES DE LA EJECUCION

### 9.7.1.- Generalidades

Se interrumpirá el hormigonado cuando llueva con una intensidad que pudiera, a juicio del Director de las Obras, provocar la deformación del borde de las losas o la pérdida

de la textura superficial del hormigón fresco.

La descarga del hormigón transportado deberá realizarse antes de que haya transcurrido un período máximo de cuarenta y cinco minutos (45 min), a partir de la introducción del cemento y de los áridos en el mezclador. El Director de las Obras podrá aumentar este plazo si se utilizan retardadores de fraguado, o disminuirlo si las condiciones atmosféricas originan un rápido endurecimiento del hormigón.

No deberá transcurrir más de una hora (1 h) entre la fabricación del hormigón y su terminación. El Director de las Obras podrá aumentar este plazo hasta un máximo de dos horas (2 h), si se emplean cementos cuyo principio de fraguado no tenga lugar antes de dos horas y media (2 h 30 min), si se adoptan precauciones para retrasar el fraguado del hormigón o si las condiciones de humedad y temperatura son favorables. En ningún caso se colocarán en obra amasadas que acusen un principio de fraguado, o que presenten segregación o desecación.

Salvo que se instale una iluminación suficiente, a juicio del Director de las Obras, el hormigonado del pavimento se detendrá con la antelación suficiente para que el acabado se pueda concluir con luz natural.

Si se interrumpe la puesta en obra por más de media hora (1/2 h) se cubrirá el frente de hormigonado de forma que se impida la evaporación del agua. Si el plazo de interrupción fuera superior al máximo admitido entre la fabricación y puesta en obra del hormigón, se dispondrá una junta de hormigonado transversal, según lo indicado en el apartado 5.8.

#### **9.7.2.- Limitaciones en tiempo caluroso**

En tiempo caluroso se extremarán las precauciones, de acuerdo con las indicaciones del Director de las Obras, a fin de evitar desecaciones superficiales y fisuraciones.

Apenas la temperatura ambiente rebase los veinticinco grados Celsius (25º C), se controlará constantemente la temperatura del hormigón, la cual no deberá rebasar en ningún momento los treinta grados Celsius (30º C). El Director de las Obras podrá ordenar la adopción de precauciones suplementarias a fin de que el material que se fabrique no supere dicho límite.

#### **9.7.3.- Limitaciones en tiempo frío**

La temperatura de la masa de hormigón, durante su puesta en obra, no será inferior a cinco grados Celsius (5º C) y se prohibirá la puesta en obra del hormigón sobre una superficie cuya temperatura sea inferior a cero grados Celsius (0º C).

En general, se suspenderá la puesta en obra siempre que se prevea que, dentro de

las cuarenta y ocho horas (48 h) siguientes, pueda descender la temperatura ambiente por debajo de los cero grados Celsius (0° C). En los casos que, por absoluta necesidad, se realice la puesta en obra en tiempo con previsión de heladas, se adoptarán las medidas necesarias para garantizar que, durante el fraguado y primer endurecimiento del hormigón, no se producirán deterioros locales en los elementos correspondientes, ni mermas permanentes apreciables de las características resistentes del material.

Si, a juicio del Director de las Obras, hubiese riesgo de que la temperatura ambiente llegase a bajar de cero grados Celsius (0° C) durante las primeras veinticuatro horas (24 h) de endurecimiento del hormigón, el Contratista deberá proponer precauciones complementarias, las cuales deberán ser aprobadas por el Director de las Obras. Si se extendiese una lámina de plástico de protección sobre el pavimento, se mantendrá hasta el aserrado de las juntas.

El sellado de juntas en caliente se suspenderá, salvo indicación expresa del Director de las Obras, cuando la temperatura ambiente baje de cinco grados Celsius (5° C), o en caso de lluvia o viento fuerte.

#### **9.7.4.- Apertura a la circulación**

El paso de personas y de equipos, para el aserrado y la comprobación de la regularidad superficial, podrá autorizarse cuando hubiera transcurrido el plazo necesario para que no se produzcan desperfectos superficiales, y se hubiera secado el producto filmógeno de curado, si se emplea este método.

El tráfico de obra no podrá circular sobre el pavimento hasta que éste no haya alcanzado una resistencia a tracción indirecta del ochenta por ciento (80%) de la exigida a veintiocho días (28 d). Todas las juntas que no hayan sido obturadas provisionalmente con un cordón deberán sellarse lo más rápidamente posible. La apertura a la circulación no podrá realizarse antes de siete días (7 d) de la terminación del pavimento.

### **9.8.- CONTROL DE CALIDAD**

#### **9.8.1.- Control de procedencia de los materiales**

##### Cemento

Se seguirán las prescripciones del artículo 202 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

##### Áridos

Si con los áridos se aportara certificado acreditativo del cumplimiento de las especificaciones obligatorias de este artículo o documento acreditativo de la homologación

de la marca, sello o distintivo de calidad del árido, según lo indicado en el apartado 11, los criterios descritos a continuación para realizar el control de procedencia de los áridos no serán de aplicación obligatoria, sin perjuicio de las facultades que correspondan al Director de las Obras.

En el supuesto de no cumplirse las condiciones indicadas en el apartado anterior, de cada procedencia del árido, y para cualquier volumen de producción previsto, se tomarán cuatro (4) muestras, según la UNE-EN 932-1, y de cada fracción de ellas se determinará:

- El coeficiente de Los Ángeles del árido grueso, según la UNE-EN 1097-2.
- La granulometría de cada fracción, especialmente del árido fino, según la UNE-EN 933-1.
- El equivalente de arena del árido fino, según la UNE-EN 933-8.
- El índice de lasjas del árido grueso
- El contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm del árido grueso
- El contenido máximo de finos pasando por el tamiz 0,063 mm del árido fino
- El porcentaje de caras de fractura del árido grueso
- La resistencia a la fragmentación del árido grueso
- La resistencia al pulimento del árido grueso

El Director de las Obras podrá ordenar la repetición de estos ensayos sobre nuevas muestras, y la realización del siguiente ensayo adicional:

- Contenido de partículas arcillosas del árido fino, según la UNE 7133.

### 9.8.2.- Control de calidad de los materiales

#### Cemento

De cada partida de cemento que llegue a la central de fabricación se llevará a cabo su recepción, según los criterios contenidos en la Instrucción RC-08 y los del artículo 202 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

#### Áridos

Se examinará la descarga al acopio o alimentación de la central de fabricación, desechando los áridos que, a simple vista, presentasen restos de tierra vegetal, materia orgánica o tamaños superiores al máximo. Se acopiarán aparte aquéllos que presentasen alguna anomalía de aspecto, tal como distinta coloración, segregación, lasjas, plasticidad, etc. y se vigilará la altura de los acopios y el estado de sus separadores y accesos.

Sobre cada fracción de árido que se produzca o reciba, se realizarán los siguientes ensayos:

- Al menos dos (2) veces al día, una por la mañana y otra por la tarde:
  - Granulometría, según la UNE-EN 933-1.
  - Equivalente de arena del árido fino, según la UNE-EN 933-8.
  - En su caso, el contenido de partículas arcillosas del árido fino, según la UNE 7133.
  - Índice de lajas del árido grueso, según la UNE-EN 933-3.
  - Proporción de finos que pasan por el tamiz 0,063 mm de la UNE-EN 933-2.
- Al menos una (1) vez al mes, y siempre que cambie el suministro de una procedencia aprobada:
  - Coeficiente de Los Ángeles del árido grueso, según la UNE-EN 1097-2.
  - Sustancias perjudiciales, según la vigente Instrucción de Hormigón Estructural (EHE) o normativa que la sustituya.

### 9.8.3.- Control de ejecución

#### Fabricación

Se tomará diariamente al menos una (1) muestra de la mezcla de áridos, y se determinará su granulometría, según la UNE-EN 933-1. Al menos una (1) vez cada quince días (15 d) se verificará la precisión de las básculas de dosificación, mediante un conjunto adecuado de pesas patrón.

Se tomarán muestras a la descarga del mezclador, y con ellas se efectuarán los siguientes ensayos:

- En cada elemento de transporte:
  - Control del aspecto del hormigón y, en su caso, medición de su temperatura. Se rechazarán todos los hormigones segregados o cuya envuelta no sea homogénea.
- Al menos dos (2) veces al día (mañana y tarde) y para cada uno de los hormigones:
  - Contenido de aire ocluido en el hormigón, según la UNE -EN 12350-2.
  - Consistencia, según la UNE – EN 12350-2.
  - Fabricación de probetas para ensayo a tracción indirecta, según la UNE – EN 12390-6, admitiéndose también el empleo de mesa vibrante. Dichas probetas se conservarán en las condiciones previstas en la citada norma.



El número de amasadas diferentes para el control de la resistencia de cada una de ellas en un mismo lote hormigonado, no deberá ser inferior a tres (3). Por cada amasada controlada se fabricarán, al menos, tres (3) probetas.

#### Puesta en obra

Se medirán la temperatura y humedad relativa del ambiente mediante un termohigrógrafo registrador, para tener en cuenta las limitaciones del apartado 8.

Al menos dos (2) veces al día, una por la mañana y otra por la tarde, así como siempre que varíe el aspecto del hormigón, se medirá la consistencia de cada uno de los hormigones. Si el resultado obtenido rebasa los límites establecidos respecto de la fórmula de trabajo, se rechazará la amasada.

Se comprobará frecuentemente el espesor extendido, mediante un punzón graduado u otro procedimiento aprobado por el Director de las Obras, así como la composición y forma de actuación del equipo de puesta en obra, verificando la frecuencia y amplitud de los vibradores.

#### Control de recepción de la unidad terminada

Se considerará como lote, que se aceptará o rechazará en bloque, al menor que resulte de aplicar los tres (3) criterios siguientes al pavimento de hormigón:

- Quinientos metros (500 m) de calzada.
- Tres mil quinientos metros cuadrados (3.500 m<sup>2</sup>) de calzada.
- La fracción construida diariamente.

Al día siguiente de aquél en que se haya hormigonado o cuando éste haya endurecido lo suficiente, se determinará, en emplazamientos aleatorios, la profundidad de la textura superficial por el método del círculo de arena, según la NLT-335, con la frecuencia fijada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o la que, en su defecto, señale el Director de las Obras. El número mínimo de puntos a controlar por cada lote será de dos (2), que se ampliarán a cinco (5) si la textura de alguno de los dos primeros es inferior a la prescrita. Después de diez (10) lotes aceptados, el Director de las Obras podrá reducir la frecuencia de ensayo.

El espesor de las losas, así como de cada una de las capas, y la homogeneidad del hormigón se comprobarán mediante extracción de testigos cilíndricos en emplazamientos aleatorios, con la frecuencia fijada en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o que, en su defecto, señale el Director de las Obras. El número mínimo de puntos a controlar por cada lote será de dos (2), que se ampliarán a cinco (5) si el espesor de alguno de los dos primeros resultara ser inferior al prescrito o su aspecto indicara una compactación inadecuada. Los agujeros producidos se rellenarán con hormigón de la misma calidad que el utilizado en el resto del pavimento, el cual será correctamente

enrasado y compactado. El Director de las Obras determinará si los testigos han de romperse a tracción indirecta en la forma indicada en el apartado 550.6 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes, pudiendo servir como ensayos de información, según el apartado 550.10.1.2 del Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para Obras de Carretera y Puentes.

Las probetas de hormigón, conservadas en las condiciones previstas en la UNE – EN 12390-2, se ensayarán a flexotracción a veintiocho días (28 d), según la UNE – EN 12390-5. El Director de las Obras podrá ordenar la realización de ensayos complementarios a dos días (2 d).

En todos los semiperfiles se comprobará que la superficie extendida presenta un aspecto uniforme, así como la ausencia de defectos superficiales importantes tales como segregaciones, falta de textura superficial, etc.

Se controlará la regularidad superficial del lote a partir de las veinticuatro horas (24 h) de su ejecución mediante la determinación del índice de regularidad internacional (IRI), según la NLT-330, que deberá cumplir lo especificado en el apartado 6.3. La comprobación de la regularidad superficial de toda la longitud de la obra tendrá lugar además antes de la recepción definitiva de las obras.

## 9.9.- CRITERIOS DE ACEPTACION O RECHAZO

### 9.9.1.- Resistencia mecánica

#### Ensayos de control

A partir de la resistencia estimada a tracción indirecta para cada lote por el procedimiento fijado en este pliego, se aplicarán los siguientes criterios:

- Si la resistencia estimada no fuera inferior a la exigida, se aceptará el lote.
- Si fuera inferior a ella, pero no a su noventa por ciento (90%), el Contratista podrá elegir entre aceptar las sanciones previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o solicitar la realización de ensayos de información. Dichas sanciones no podrán ser inferiores a la aplicación de una penalización al precio unitario del lote, cuya cuantía sea igual al doble de la merma de resistencia, expresadas ambas en proporción.
- Si la resistencia estimada fuera inferior al noventa por ciento (90%) de la exigida, se realizarán ensayos de información.

La resistencia de cada amasada a una determinada edad, se determinará como media de las resistencias de las probetas fabricadas con hormigón de dicha amasada y ensayadas a dicha edad. A partir de la mínima resistencia obtenida en cualquier amasada

del lote, se podrá estimar la característica multiplicando aquélla por un coeficiente dado por la tabla 9.5.

Número de amasadas controladas en el lote	Coeficiente multiplicador
2	0,88
3	0,91
4	0,93
5	0,95
6	0,96

*Tabla 9.5.- Coeficiente multiplicador en función del número de amasadas*

#### Ensayos de información

Antes de transcurridos cincuenta y cuatro días (54 d) de su puesta en obra, se extraerán del lote seis (6) testigos cilíndricos, según la UNE 83302, situados en emplazamientos aleatorios que disten entre sí un mínimo de siete metros (7 m) en sentido longitudinal, y separados más de cincuenta centímetros (50 cm) de cualquier junta o borde. Estos testigos se ensayarán a tracción indirecta, según la UNE 83306, a la edad de cincuenta y seis días (56 d), después de haber sido conservados durante las cuarenta y ocho horas (48 h) anteriores al ensayo en las condiciones previstas en la UNE 83302.

El valor medio de los resultados de estos ensayos se comparará con el valor medio de los resultados del tramo de prueba o, si lo autorizase el Director de las Obras, con los obtenidos en un lote aceptado cuya situación e historial lo hicieran comparable con el lote sometido a ensayos de información:

- Si no fuera inferior, el lote se considerará aceptado.
- Si fuera inferior a él, pero no a su noventa por ciento (90%), se aplicarán al lote las sanciones previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares.
- Si fuera inferior a su noventa por ciento (90%), pero no a su setenta por ciento (70%), el Director de las Obras podrá aplicar las sanciones previstas en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares, o bien ordenar la demolición del lote y su reconstrucción, por cuenta del Contratista.
- Si fuera inferior a su setenta por ciento (70%) se demolerá el lote y se reconstruirá, por cuenta del Contratista.

Las sanciones referidas no podrán ser inferiores a la aplicación de una penalización al precio unitario del lote, cuya cuantía sea igual al doble de la merma de resistencia, expresadas ambas en proporción.

### 9.9.2.- Integridad

Los bordes de las losas y los labios de las juntas que presenten desconchados serán reparados con resina epoxi, según las instrucciones del Director de las Obras.

Las losas no deberán presentar grietas. El Director de las Obras podrá aceptar pequeñas fisuras de retracción plástica, de corta longitud y que manifiestamente no afecten más que de forma limitada a la superficie de las losas, y podrá exigir su sellado.

Si una losa presenta una grieta única y no ramificada, sensiblemente paralela a una junta, el Director de las Obras podrá aceptar la losa si se realizasen las operaciones indicadas a continuación:

Si la junta más próxima a la grieta no se hubiera abierto, se instalarán en ésta pasadores o barras de unión, con disposición similar a los existentes en la junta. La grieta se sellará, previa regularización y cajeo de sus labios.

Si la junta más próxima a la grieta se hubiera abierto, ésta se inyectará, tan pronto como sea posible, con una resina epoxi aprobada por el Director de las Obras, que mantenga unidos sus labios y restablezca la continuidad de la losa.

En losas con otros tipos de grieta, como las de esquina, el Director de las Obras podrá aceptarlas u ordenar la demolición parcial de la zona afectada y posterior reconstrucción. En el primer caso, la grieta se inyectará tan pronto como sea posible, con una resina epoxi aprobada por el Director de las Obras, que mantenga unidos sus labios y restablezca la continuidad de la losa. Ninguno de los elementos de la losa después de su reconstrucción podrá tener una (1) de sus dimensiones inferiores a treinta centímetros (0,30 m). La reposición se anclará mediante grapas al resto de la losa.

La recepción definitiva de una losa agrietada y no demolida no se efectuará más que si, al final del período de garantía, las grietas no se han agravado ni han originado daños a las losas vecinas. En caso contrario, el Director podrá ordenar la total demolición y posterior reconstrucción de las losas agrietadas.

### 9.9.3.- Espesor

El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá fijar las penalizaciones a imponer por falta de espesor. Dichas penalizaciones no podrán ser inferiores a las siguientes:

Si la media de las diferencias entre el espesor medido y el prescrito fuera positiva, y no más de un (1) individuo de la muestra presentase una merma (diferencia negativa) superior a veinte milímetros (20 mm), se aplicará, al precio unitario del lote, una penalización de un cinco por mil (0,5%) por cada milímetro (mm) de dicha merma.

Si la merma media fuera inferior o igual a veinte milímetros (20 mm), y no más de un (1) individuo de la muestra presenta una merma superior a treinta milímetros (30 mm), se aplicará, al precio unitario del lote, una penalización de un uno por ciento (1%) por cada milímetro (mm) de merma media.

En los demás casos, se demolerá y reconstruirá el lote a expensas del Contratista.

#### 9.9.4.- Rasante

Las diferencias de cota entre la superficie obtenida y la teórica establecida en los Planos del Proyecto no excederán de las tolerancias especificadas, ni se aceptarán zonas que retengan agua. El Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares deberá fijar las penalizaciones a imponer en cada caso.

#### 9.9.5.- Regularidad superficial

En los tramos donde los resultados de la regularidad superficial excedan de los límites especificados en el apartado 6.3, se procederá de la siguiente manera:

- Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en el apartado 6.3 en menos del diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado, se corregirán los defectos de regularidad superficial mediante fresado, siempre que no suponga una reducción del espesor de la capa por debajo del valor especificado en los Planos y que la superficie disponga de un acabado semejante al conjunto de la obra. Por cuenta del Contratista se procederá a la corrección de los defectos o bien a la demolición y retirada al vertedero.
- Si los resultados de la regularidad superficial de la capa acabada exceden los límites establecidos en el apartado 6.3 en más del diez por ciento (10%) de la longitud del tramo controlado, se demolerá el lote y se retirará a vertedero por cuenta del Contratista.

#### 9.9.6.- Textura superficial

La profundidad media de la textura superficial deberá cumplir el límite establecido con ningún valor individual inferior a cincuenta centésimas de milímetro (0,50 mm).

Si la profundidad media de la textura excediese del límite especificado, el Contratista lo corregirá, a su cargo, mediante un fresado de pequeño espesor (inferior a un centímetro), siempre que el espesor de la losa no sea inferior en un centímetro al previsto en el proyecto.

### 9.9.7.- Resistencia al deslizamiento

El Coeficiente de rozamiento transversal (CRT) medio medido según la NLT-336 deberá cumplir el límite especificado y no más de un cinco por ciento (5%) de la longitud total del lote por debajo de cinco (5) puntos.

### 9.10.- MEDICIÓN Y ABONO

Las mediciones se realizarán sobre Planos, e incluirán el tramo de prueba satisfactorio.

El pavimento de hormigón completamente terminado, incluso la preparación de la superficie de apoyo, se abonará por metros cúbicos ( $m^3$ ), medidos sobre Planos. Se descontarán las sanciones impuestas por resistencia insuficiente del hormigón o por falta de espesor del pavimento. Salvo que el Cuadro de Precios y el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares prevean explícitamente lo contrario, se considerarán incluidos el abono de juntas, armaduras y todo tipo de aditivos.

No se abonarán las reparaciones de juntas defectuosas, ni de losas que acusen irregularidades superiores a las tolerables o que presenten textura o aspecto defectuosos.

Para el abono de las juntas, aparte del abono del pavimento de hormigón, será necesario que hubiera estado previsto en el Cuadro de Precios y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. Se considerarán incluidos dentro del abono todos sus elementos (pasadores, barra de unión, sellado) y las operaciones necesarias para su ejecución.

Para el abono de las armaduras, aparte del abono del pavimento de hormigón, será necesario que se haya previsto en el Cuadro de Precios y el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares. En este supuesto, se medirán y abonarán de acuerdo con lo especificado en el artículo 600 de este Pliego.

Para el abono de los aditivos aparte del abono del pavimento de hormigón, será necesario que se haya previsto en el Cuadro de Precios y en el Pliego de Prescripciones Técnicas Particulares y, además, que su empleo haya sido autorizado por el Director de las Obras. En este caso, los aditivos se abonarán por kilogramos (kg) realmente utilizados.

Si el árido grueso empleado para capas de rodadura, además de cumplir todas y cada una de las prescripciones especificadas en el apartado Áridos que figuran anteriormente, tuviera un valor del coeficiente de pulimento acelerado, según UNE-EN 1097-8, superior en cuatro (4) puntos al valor mínimo especificado en este Pliego para la categoría de tráfico pesado que corresponda, se abonará una unidad de obra definida como tonelada (t) de incremento de calidad de áridos en capa de rodadura y cuyo importe será el diez por ciento (10%) del abono de tonelada de hormigón de capa de rodadura,

siendo condición para ello que esta unidad de obra esté incluida en el Presupuesto del Proyecto.

Si los resultados de regularidad superficial de la capa de rodadura mejoran los valores especificados en este Pliego, para firmes de nueva construcción, con posibilidad de abono adicional, se abonará una unidad de obra definida como tonelada (t), o en su caso metro cuadrado (m<sup>2</sup>), de incremento de calidad de regularidad superficial en capa de rodadura y cuyo importe será el cinco por ciento (5%) del abono de tonelada de hormigón de capa de rodadura o en su caso , de unidad de superficie, siendo condición para ello que esta unidad de obra esté incluida en el Presupuesto del Proyecto.

### 9.11.- ESPECIFICACIONES TECNICAS Y DISTINTIVOS DE CALIDAD

El cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias requeridas a los productos contemplados en este artículo, se podrá acreditar por medio del correspondiente certificado que, cuando dichas especificaciones estén establecidas exclusivamente por referencia a normas, podrá estar constituido por un certificado de conformidad a dichas normas.

Si los referidos productos disponen de una marca, sello o distintivo de calidad que asegure el cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo, se reconocerá como tal cuando dicho distintivo esté homologado por la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento.

El certificado acreditativo del cumplimiento de las especificaciones técnicas obligatorias de este artículo podrá ser otorgado por las Administraciones Públicas competentes en materia de carreteras, la Dirección General de Carreteras del Ministerio de Fomento (según ámbito) o los Organismos españoles —públicos y privados— autorizados para realizar tareas de certificación o ensayos en el ámbito de los materiales, sistemas y procesos industriales, conforme al Real Decreto 2200/95, de 28 de diciembre.





## CAPÍTULO 10

### CONCLUSIONES

#### 10.1.- CONCLUSIONES GENERALES

Al introducir un producto o proceso nuevo en mercado, es usual querer comparar con soluciones alternativas existentes. Esta podría ser la tentación en el caso del presente documento donde se desarrolla una técnica pionera en España de pavimentos bicapa de hormigón, en un contexto más habituado a los firmes flexibles, con capa de rodadura de mezclas bituminosas de diferente tipo.

Ahora bien en el documento se ha huido de una comparación directa, en la creencia de que en ingeniería no hay una solución única, si no que en cada caso específico, función de cuales son las condiciones de controno, la solución puede ser una u otra. En consecuencia, el planteamiento realizado es un planteamiento proactivo de explicar las características de estos pavimentos bicapa de hormigón desde diferentes puntos de vista (planificación, proyecto, construcción, materiales, control de calidad, mantenimiento), abriendo la mirada a una visión global de la contribución de los mismos a la sostenibilidad; sin buscar un enfrentamiento frente a otras soluciones, ya contrastadas.

El trabajo realizado, tanto desde el punto de vista teórico como en la experiencia práctica del tramo piloto en el contexto de las obras de **Mejora general, desdoblamiento y acondicionamiento de la carretera C-17** de Cataluña que gestiona la empresa

concesionaria CEDINSA, formando parte de la Unión Temporal de Empresas adjudicatarias de esta obra (U.T.E. Vic-Ripoll), la empresa FCC Construcción, ponen de manifiesto que **si la solución está bien planteada y construida**, esta solución da **respuesta satisfactoria a las prestaciones exigidas en los diferentes planos de requerimientos**, equivalentes a los firmes flexibles anteriormente citados.

Respecto a la implantación práctica de esta solución, será el mercado quien de la respuesta, si bien hay que reseñar la importancia que en el análisis de alternativas tiene el factor de vida útil (con frecuencia no bien establecida) y la adaptabilidad y flexibilidad de las soluciones a factores de evolución temporal, tanto de las posibles cambios en las solicitudes, como en las respuestas funcionales y estructurales.

El planteamiento dado en este documento, no es un salto en el vacío, si no que, aparte de la experiencia realizada, se apoya de forma versátil en la experiencia austriaca e internacional recogida, incluso, a nivel normativo.

## 10.2.- CONCLUSIONES ESPECÍFICAS

A manera de resumen de cada capítulo, tomándolas como conclusiones específicas, de cada una de las etapas, que se derivan del trabajo, pueden citarse las siguientes, como más representativas:

### Planificación

- Como se pone en evidencia en el capítulo 1, los momentos de crisis (ver figura 1.1) son períodos de oportunidades de innovación, para avanzar con relación a las soluciones existentes, adaptadas a circunstancias específicas de evolución de costes de materias primas, dependencia externa, aspectos sociales de creación de empleo, etc. En definitiva se debe buscar con estas soluciones novedosas avanzar en el desarrollo sostenible, aumentar la competitividad así como la generación del conocimiento y su mejora continua.

### Proyecto

- Los pavimentos bicapa son una estructura y como tal hay que tratarla. En el capítulo 2, dedicado al proyecto, se presentan las acciones a considerar y la equivalencia de ejes a considerar entre la experiencia austriaca y lo propuesto en la normativa española para diferentes tipos de tráfico pesado. Asimismo se presentan las equivalencias de secciones, lo cual puede ser de gran ayuda para el proyectista.

- Para el guiado de las extendedoras, este tipo de pavimentos requiere una zona de apoyo, por ambos lados, del entorno de los 70 cm, debiendo considerar en proyecto las implicaciones asociadas.
- Este manual detalla las características de las juntas a utilizar, incidiendo al mismo tiempo en las características de intersección con otros tipo de elementos (puentes, etc), pudiendose afirmar que la tecnología es estandar y fácilmente implementable en la práctica.

### Ejecución

- El procedimiento constructivo es de alto nivel tecnológico, con equipos humanos bien formados y posibilidades de altos rendimientos. En general, precisa de duplicar equipos de extendedoras y centrales de hormigón preparado. Este mayor nivel de exigencia, es en cierta medida, un indicador del alto nivel de las prestaciones desde el punto de vista de calidad, en condiciones estándar.
- El proceso requiere una buena coordinación de todos los agentes que intervienen en el mismo, cara a evitar juntas y otros tipos de problemas entre capas. Esa menor relajación que implica el sistema es, en cierta medida, garantía de altos rendimientos que se pueden alcanzar.
- En el capítulo 3 de ejecución se presentan las medidas preventivas para evitar incidencias, si bien al mismo tiempo se presentan medidas de actuación en el caso de presentarse alguna incidencia, ya sea prevista (juntas de fin de jornada) como imprevistas. Con ello se pretende dar confianza al técnico de obras sobre los pasos a seguir en el caso de aparecer incidencias.

### Materiales

- Los pavimentos bicapa utilizan recursos locales no importados, lo que implica una mayor independencia estratégica, contribuyendo eficientemente a generar riqueza local, y consecuentemente, a mejorar las condiciones sociales.
- Los materiales utilizados en estos pavimentos son de la gama alta de prestaciones, con especial énfasis en los áridos correspondientes a la capa de rodadura, tanto desde el punto de vista mecánico, como de prestaciones funcionales (deslizamiento, rozamiento lateral, etc.).
- Los hormigones empleados deben tener una resistencia característica a flexotracción según (EN-12390-5), superior a 5,0 N/mm<sup>2</sup> en la capa de rodadura y a 4,5 y 4,0 N/mm<sup>2</sup>, para las capas de base, en función de utilizar un HF-4,5 o HF-4,0, respectivamente.

### Control de calidad

- En el Manual se propone una serie de medidas de control que abarcan a todas las etapas del proceso (explanada, capa de regularización, pavimento acabado) y a los materiales, tanto desde el punto de vista de materiales constituyentes, como de producto (hormigón preparado). Asimismo se define los lotes en cada uno de los casos.
- La explanada tiene una gran importancia en el éxito de estas soluciones. Por ello, se hace un énfasis especial, requiriendo para el control de calidad de la misma sobre la que apoya la capa de regulación medidas que inciden en: la geometría, espesor y módulo de deformación.

### Conservación

- Este tipo de pavimentos no tiene por qué introducir diferencias apreciables en las políticas de gestión de pavimentos establecidas previamente por cada Administración. En todo caso, las incidencias serían favorables, así el período entre las diferentes inspecciones en los planes de mantenimiento puede, por un lado, hacerse variable la frecuencia y, por otro lado, aumentar los tiempos, dada las cinéticas más lentas de degradación del hormigón, si la solución está bien resuelta.
- En estos pavimentos es posible actuaciones correctoras ante las disfunciones que aparezcan en textura, juntas, etc. (por ejemplo, fresados superficiales, reparación de juntas, etc.) utilizando las técnicas usuales en estructuras de hormigón, ampliamente conocidas y con numerosas empresas especializadas.
- Para el caso de problemas en la explanada que requieran reparación y/o sustitución de losas, es preferible ir hacia una sustitución, dejando sólo las medidas locales de reparación para actuaciones temporales. Aunque las circunstancias son diferentes en estos casos, el procedimiento y los materiales son los mismos que en el caso de nueva construcción.

### Análisis de la sostenibilidad

- La introducción de la sostenibilidad en un manual técnico es una de las primeras experiencias españolas, en línea con la reciente Instrucción del hormigón Estructural (EHE-08). Ello permite reflexionar desde una perspectiva más amplia y puede ayudar a las administraciones a valorar las propuestas incorporando no sólo los aspectos económicos, si no también los ambientales y sociales derivados de las soluciones analizadas. Asimismo, se abre la vía para poder evaluar las alternativas desde el punto de vista de sostenibilidad, sin llegar a desarrollar la propuesta específica.

- Los datos aportados hay que entenderlos como una referencia para ayudar al técnico en el análisis de la decisión, debiéndose contrastar con datos provenientes de otras fuentes, si bien hay que resaltar a este respecto la importancia de definir de forma precisa los límites del sistema en el caso de querer hacer una evaluación (comparación) de forma directa.
- A manera de ejemplo y, cara a ayudar a entender el planteamiento, dado que una carretera es una infraestructura para la sociedad, en el análisis económico hay que tener en cuenta el **coste de la disponibilidad del uso**, que tenga en cuenta el tiempo que se tarda en hacer reparaciones y mantener una instalación lo cual es traducible en un coste importante para todos los usuarios de las infraestructuras; esto es en un coste social de no disponibilidad.

#### Experiencia piloto

- Hay que entender la experiencia piloto realizada como un éxito, ya que se ha logrado implementar una técnica pionera en España, con resultados altamente satisfactorios en su conjunto, a la espera de ver el comportamiento tras un ciclo completo anual desde el punto de vista climático.

Por último, hay que interpretar este documento no como un documento final que cierra una etapa, si no como un conocimiento vivo que irá mejorando a medida que aumenten el número de experiencias de este tipo, lo que dará paso a posteriores versiones del mismo.

Evidentemente en ese futuro, existen caminos de mejora, tal como la posible introducción de geotextiles en sustitución de la mezcla bituminosa entre explanada y pavimento, en las texturas superficiales de la capa de rodadura, etc; pero para hacerlo viable se precisa, por un lado, avanzar en los temas de investigación y, por otro lado, en una actitud positiva de las administraciones cara a la innovación que representa este tipo de soluciones.





## CAPÍTULO 11

### BIBLIOGRAFÍA

#### 11.1.- REFERENCIAS CITADAS EN EL DOCUMENTO

ACPA (American Concrete Pavement Association) (1998) *Whitetopping – State of Practice*, EB210P.

ACPA (2008). *Uniform Support in Concrete Pavement Structures*. Ref. TS204.1P. American Concrete Pavement Association. Ver dirección web en apartado 10.2.

ACPA (1999) *Construction Specification Guideline for Ultra-Thin Whitetopping*. Information Series IS120P, Skokie, IL: American Concrete Pavement Association.

Adams, W.M. (2006) *The Future of Sustainability: Re-thinking Environment and Development in the Twenty-first Century*. Report of the IUCN Renowned Thinkers Meeting, 29–31 January.

Aguado, A.; Josa, A.; Pindado, M.A. (1997) *Caracterización experimental y numérica de Hormigones Porosos Modificados con Polímeros*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Escuela Técnico Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos de Barcelona, Universidad Politécnica de Cataluña. Trabajo integrado en el proyecto BRITE-EURAM BE-3415. Monografía CIMNE, nº 37. Barcelona, Enero 1997.

- Aguado, A., Alarcón, B. y Manga, R. (2008) *Razón de ser del anejo ICES de la EHE y características del mismo*. Revista Cemento Hormigón, no 913, pp 18-25. ISSN. 0008-8919.
- Akbari, H., Menon, S. y Rosenfeld, A. (2007) *Global Cooling: Effect of Urban Albedo on Global Temperature*. 2nd PALENC & 28th AIVC Conference, Crete, Sep 27-28.
- Allen, J.O., Alexandrova, O. y Kaloush, K.E. (2006) *Tire wear emissions for asphalt rubber and portland cement concrete pavement surfaces*. Arizona Department of Transportation. Final Report (Contract KR-04-0720-TRN). pp.: 41. Abril.
- American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) (2005) *“Standard Specifications for Transportation Materials and Methods of Sampling and Testing”*. 25th Edition, AASHTO Provisional Standards, Washington, DC.
- Asaeda, T., Ca, V.T. y Wake, A. (1995) *Heat Storage of Pavement and its Effect on the Lower Atmosphere*. Atmospheric Environment 30: 413 - 427.
- Asaeda, T., Ca, V.T. y Wake, A. (1993) *Heating of paved ground and its effects on the near surface atmosphere*. Exchange Processes at the Land Surface for a Range of Surface and Time Scales. Proceedings of the Yokohama Symposium, July 1993. IAHS Publ. 212.
- Athena Sustainable Materials Institute. (2006) *A Life Cycle Perspective on Concrete and Asphalt Roadways: Embodied Primary Energy and Global Warming Potential*. Ottawa.
- ASTM D2487 (2000) *Standard Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System)*. D2487-00. West Conshohocken. PA: ASTM.
- Balaguer, E. y Fernández del campo, J.A. (1973) *Firmes de carreteras*. Editado por los autores. Madrid
- Brundtland. (1987) *Our Common Future, Report of the World Commission on Environment and Development, World Commission on Environment and Development*. Published as Annex to General Assembly document A/42/427, Development and International Co-operation: Environment August 2.
- Cardim, A. (2001) *“Análisis del ciclo de vida de productos derivados del cemento. Aportaciones al análisis de los inventarios del ciclo de vida del cemento”*. Tesis doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.C. 18 de julio. Directores: Antonio AGUADO y Alejandro JOSA
- Conter, M. (2008) *Statistical Properties of Road Traffic Noise Emission Measurements*. 6th Symposium on Pavement Surface Characteristics. Portorož, Slovenia.

- Croney, D. and Croney, P. (1998). *Design and Performance of Road Pavements*. New York, NY: McGraw Hill.
- del Val Melús, M.A. (2007) *Los pavimentos en las carreteras españolas del siglo XX*. Revista de Obras Públicas nº 3.482, pp: 7-23. Noviembre.
- Dirección General de Carreteras (2008) *Pliego de prescripciones técnicas generales para obras de carreteras y puentes PG-3*. Ministerio de Fomento. Ediciones Liteam, Madrid.
- EHE (2008) *Instrucción de hormigón estructural*. Norma EHE-08, aprobada por el Real Decreto 1247/2008 del 18 de julio (BOE del 22.08.2008). Ministerio de Fomento.
- FCC Construcción (2010) *Informe del tramo de demostración para Firme de Hormigón Bicapa realizado los días 15,16 y 17 de Marzo de 2010 en las obras de la Autovía C-17 (Barcelona)*. Proyecto Demostración de Firme Rígido Carretera C-17 Vic-Ripoll; Laboratorio Central de FCC (Subdirección de Servicios Técnicos). Barcelona, Marzo.
- FHWA (Federal Highway Administration). (1980) *Development and Use of Price Adjustment Contract Provisions*. Technical Advisory No. T 5080.3. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- FHWA. (1996) *Tire-Pavement Noise and Safety Performance*. Publication. No. FHWA-SA-96-068. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- FHWA. (2009) *Considerations for Rigid vs. Flexible Pavement Designs when allowed as alternate bids*. Technical report. Report 0-6085-1. Washington, DC: Federal Highway Administration.
- Follía, J. (2010) *La conservación de carreteras en Catalunya. Conservació de carreteres de àmbit autonòmic i local*. PTOP. Generalitat de Catalunya. Presentación en power point. 32 diapositivas.
- Gajda, J.W. y Van Geem, M.G. (1997) *A Comparison of Six Environmental Impacts of Portland Cement Concrete and Asphalt Cement Concrete Pavement*, PCA R&D Serial No. 2068, Portland Cement Association.
- Garber, N.J. and Hoel, L.A.; *Traffic & Highway Engineering*, 3rd edition, Pacific Grove, CA: Brooks-Cole, 2002.
- Garcia, T. (2008) *Aplicació de l'assaig Barcelona pel control del formigó reforçat amb fibres utilitzat en la construcció d'un edifici industrial*. Projecte de Fi de Carrera. Enginyer en Organització Industrial. Director Pere Alavedra. Setembre. ETSEIB-UPC
- Hall, K.T., Darter, M.I., Hoerner, T.E., and Khazanovich, L.; *LTPP Data Analysis Phase I: Validation of Guidelines for k-Value Selection and Concrete Pavement Performance*

- Prediction*. FHWA-RD-96-198, Washington, DC: Federal Highway Administration, United States Department of Transportation, 1997.
- Hereu, A. (2010) *Presentació de la gestió sistematitzada de ferms (GSF) de la Direcció General de Carreteres*. PTOP. Generalitat de Catalunya. Presentación en power point. 8 diapositivas.
- Huang, Y.H.; *Pavement Analysis and Design*. 2nd Edition, Upper Saddle River, NJ: Prentice-Hall, 2004.
- Hunter, R.N. (1994) ed. *Bituminous Mixtures in Road Construction*. London: Thomas Telford Ltd.
- IUCN (1980) *World conservation strategy: Living resources conservation for sustainable development*. International Union for the Conservation of Nature, United Nations Environment Programme, Worldwide Fund for Nature, Switzerland.
- Jasienski, A. (2007) *Gestión de obras muy congestionadas*. Ejemplos de Autopista de Bélgica. Febelcem, Bélgica. Memorias del Seminario Internacional sobre rehabilitación de pavimentos de cemento. Guatemala 23 y 24 de abril. pp. 53-64.
- Jofré, C. y Vaquero, J.J. (2000) *Manual de Pavimentos Industriales*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA). Madrid.
- Jofré, C., Domínguez, J.R., Lasalle, E. y Masa, C. (2003) *Color y textura en pavimentos y paramentos de hormigón*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) 100 pag.
- Jofré, C. (2008) *Experiencias recientes con pavimentos de hormigón armado continuo. Partes 1 y 2*. Revista Rutas, 126 y 127 respectivamente, mayo-junio y julio-agosto.
- Jofré, C., Romero, J. y Rueda, R. (2010) *Pavimentos de hormigón en túneles. Su influencia en la seguridad al fuego*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA) 43 pag.
- Josa, A., Jofré, C., Fernández, R., Kraemer, C. y Vaquero, J.J. (2003) *Manual de pavimentos de hormigón para vías de baja intensidad de tráfico*. Instituto Español del Cemento y sus Aplicaciones (IECA), Madrid.
- Kohn, S.D. y Tayabji, S.D. (2003) *Best Practices for Airport Portland Cement Concrete Pavement Construction*. IPRF-01-G-002-1, Washington, DC: Innovative, 2003.
- Kraemer, C. (1965) *Pavimentos de hormigón normal y pretensado. Experiencia española en el tramo de ensayo*. Publicación nº 18 del Laboratorio de Transporte y Macánica del Suelo. Centgro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX). Madrid

- Kraemer, C. (1981) *Los pavimentos de hormigón. Características, Tipos y Aplicaciones*. Jornadas sobre Pavimentos de hormigón. Departament de Política Territorial i Obres Públiques. Generalitat de Catalunya. Barcelona 16-18 diciembre
- Kraemer, C. y del Val, M.A. (1993) *Firmes y Pavimentos*. Caminos y Aeropuertos, Departamento de de Transportes. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Univesidad Politécnica de Madrid.
- Kraemer, C. y Val, M.A. (2004) *Ingeniería de Carreteras - Volumen 2*. S.a. McGraw-Hill / Interamericana de España, 004, Madrid.
- Kubo, K., Kido, H. y Ito, M. (2006) *Study on pavement technologies to mitigate the heat island effect and their effectiveness*. 10th ICAP2006.
- Mallick, R. B. And El-Korchi, T. (2009) *Pavement Engineering: Principles and practice*. Ed. CRC Press Taylor & Francis Group. Boca Ratón. Florida.
- Martínez, P. J. P. y Cáceres, A. M. (2008) *Consumo de energía por el transporte en España y tendencias de emisión*. Observatorio Medioambiental, vol. 11 127-147.
- Martínez, A. y Marcuerquiaga, Y. (2010) *Evolución de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos*. 16º Congreso Mundial de la Carretera de IRF (Federación Internacional de la Carretera). Lisboa | 25 - 28 de Mayo de 2010
- McNerney, M.T., Landsberger, B.J., Turen, T. y Pandelides, A. (2000) *Comparative field measurements of tire/pavement noise of selected texas pavements*. FHWA. FHWA/TX-7-2957-2.
- Metz, L. D. y Ruhl, R. L. (1990). *Skidmark Signatures of ABS-Equipped Passenger Cars*. SAE Technical Paper.
- Ministerio de Fomento (1997). *Regulación de los accesos a las carreteras del Estado, las vías de servicio y la construcción de instalaciones de servicios*. O.M. de 16 de diciembre de 1997. BOE 24 de enero 1998, núm. 21, p 2509.
- Ministerio de Fomento (2000). *Instrucción de Carreteras 6.1 IC Firmes*. BOE. 2000, 28 Feb.
- Ministerio de Fomento (2003). *Rehabilitación de Firmes*. Instrucción de Carreteras, Norma 6.3 IC.
- Molins, C., Aguado, A. and Saludes, S. (2009) *Double Punch Test to control the tensile properties of FRC (Barcelona test)*. Rev. Materials and Structures (RILEM). Vol. 42, nº 4. May. pp.: 415-425.
- Navarro, A. M. y Alda, Y. M. R. (2010) *Evolución de la resistencia al deslizamiento de los pavimentos*. IRF 2010 - XVI Congreso Mundial de Carreteras. Lisboa. pp.: 8. Mayo.

- NSTPW (Nova Scotia Transportation and Public Works) (1999) Asphalt Concrete Pavement and Portland Cement Concrete Pavement. Highway 104, Cumberland County, Year 5 of 5 Year Study.
- Perera, R.W. y Kohn, S.D. (2002) *Issues in pavement smoothness: a summary report*. NCHRP Document 42 (Project 20-51[1]): Contractors Final Report Prepared for: National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, National Research Council. pp.: 164p. Marzo.
- Polcak, K.D. (1990) Field Testing of the Effectiveness of Open-Graded Asphalt Pavement in Reducing Tire Noise from Highway Vehicles. Transportation Research Record 1265, Transportation Research Board, Washington, D.C. 1990.
- Polimón, J. (2008) *Avances tecnológicos. Criteros para la innovación*. Revista de Obras Públicas. Nº 3.485, pp.: 3742. Febrero .
- Pomerantz, M., Akbari, H., Chen, A., Taha, H. y Rosenfeld, A.H. (1997) *Paving Materials for Heat Island Mitigation*. LBL - 38074. Berkeley, CA: Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M. y Akbari, H. (1998) *Cooler Paving Materials for Heat Island Mitigation*. In 1998 ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Asilomar, CA, City: American Council for an Energy-Efficient Economy.
- Pomerantz, M., Akbari, H. y Harvey, J.T. (2000a) *Durability and Visibility Benefits of Cooler Reflective Pavements*. LBNL - 43443. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Pon, B., Akbari, H. y Chang, S.C. (2000b) *The Effect of Pavements' Temperatures on Air Temperatures in Large Cities*. LBNL - 43442. Lawrence Berkeley National Laboratory.
- Pomerantz, M., Akbari, H. y Cooler, R.T. (2000c) *Reflective pavements give benefits beyond energy savings: durability and illumination*. eScholarship Repository, Lawrence Berkeley National Laboratory, University of California, University of California. University of California eScholarship Repository (United States). <http://repositories.cdlib.org/lbnl/LBNL-45370>.
- Puig, J., Masó, D., Ortiz, J., dos Santos, A.C. y Aguado, A. (2010). *Estudio experimental sobre la influencia de la temperatura ambiental en la resistencia del hormigón preparado. (Parte II: Implementación industrial)*. Rev. Materiales de Construcción. Vol. 60. nº 298. pp.: 89-108. Abril-junio.
- Rangaraju, P.R., Amirkhanian, S. y Guven Z. (2008) *Life-Cycle Cost Analysis for Pavement Type Selection*. Clemson University and South Carolina Department of Transportation. Clemson, South Carolina.

- Ríos, B. de los (2010) *Construcción de carreteras con elementos prefabricados de hormigón*. Tesis doctoral. E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. U.P.C. 3 de junio de 2010. Directores: Antonio Aguado y Félix Edmundo Pérez.
- Rollings, R.S. (2005) *Why Do Our Concrete Pavements Still Fail?*. Proceedings of the 8th International Conference on Concrete Pavements, Volume I, Colorado Springs, CO: International Society for Concrete Pavements, pp. 167–180, 2005.
- Rosenfeld, A. H., Romm, J. J., Akbari, H., Pomerantz, M. y Taha, H. (1998) *Cool communities: Strategies for heat island mitigation and smog reduction*. Energy and Buildings 28: 51 - 62. Also Lawrence Berkeley Laboratory report, LBL - 38667.
- Saludes, S. (2006). *Ensayo de doble punzonamiento aplicado al hormigón con fibras*. Ensayo Barcelona. Tesina de especialidad. ETS. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Barcelona. UPC. 20 abril. Tutores: Antonio Aguado y Climent Molins
- Skidmark Signatures of ABS-Equipped Passenger Cars
- RVS 08.17.02. (2002) *Concrete pavement - pavement construction*. Instrucción austriaca de firmes.
- Scholz, M. y Grabowiecki, P. (2007) *Review of permeable pavement systems*. Building and Environment. Vol. 42. pp: 3830-3836.
- Smith, K.L. , Smith, K.D., Evans, L.D., Hoerner, T.E., Darter, M.I. y Woodstrom, J.H. (1997) *Smoothness Specifications for Pavements*." National Cooperative Highway Research Program, Transportation Research Board, Washington, DC. pp.: 221.
- Solminihaç, T.H., Salsilli, R., Köhler, E. y Bengoa, E. (2003) *Analysis of pavement serviceability for the aashto design method: the chilean case*. The Arabian Journal for Science and Engineering, Volume 28, Number 2B. pp.: 143-160. Octubre.
- Solaimanian, M. y Kennedy, T.W. (1993) *Predicting Maximum Pavement Surface Temperature Using Maximum Air Temperature and Hourly Solar Radiation*. Transportation Research Record 1417: 1 - 11.
- Stark, R.E. (1986) *Road Surfaces Reflectance Influences Lighting Design*. *Lighting Design + Applications*. April.
- Taha, H., Konopacki, S., y Gabersek, S. (1999) *Impacts of Large-Scale Surface Modifications on Meteorological Conditions and Energy Use: A 10-Region Modeling Study*. Theor. Appl. Climatol., 62 175-185. LBNL-39335.
- Taylor, G.W. y Patten, J.D. (2006) *Effects of Pavement Structure on Vehicle Fuel Consumption – Phase III*. Prepared for Natural Resources Canada Action Plan 2000 on Climate Change and Cement Association of Canada.



- Taylor, G.W., Farrell, P. y Woodside, A. (2002) *Additional Analysis of the Effect of Pavement Structure on Truck Fuel Consumption*. Prepared for Government of Canada Action Plan 2000 on Climate Change, Concrete Roads Advisory Committee.
- Tighe, S., Smith, T. y Fung, R. (2001), *Concrete Pavements in Canada: A Review of their Usage and Performance*. Paper for Transportation Association of Canada Annual Conference.
- UN (United Nations General Assembly) (2005) *World Summit Outcome*. Resolution A/60/1, adopted by the General Assembly on 15 September 2005. Retrieved on: 2009-02-17.
- Van Heystraeten, G. y Moraux, C. (1990) *Ten Years Experience of Porous Asphalt in Belgium*. Transportation Research Record 1265, Transportation Research Board, Washington, D.C.
- Villegas, N. (2009) *Análisis de valor en la toma de decisiones aplicado a carreteras*. Tesis doctoral E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. UPC. Director: Antonio Aguado, pp 239.
- Viñolas B., Aguado A., Josa A., Villegas N. y Fernández M.A. (2009) *Aplicación del análisis de valor para una evaluación integral y objetiva del profesorado universitario*. Monográfico: Evaluación de la calidad en la educación superior. RUSC, vol. 6, no. 1, pp 22-37. ISSN 1698-580X.
- WCED (1987) *Our common future: Report of the World Commission on Environment and Development*. United Nations, World Commission on Environment and Development. Published as annex to General Assembly document A/42/427.
- WDT (Wisconsin Department of Transportation) (1996) *Wisconsin Pavement Performance Report*, Madison, WI.
- Westergaard, H.M. (1926a) *Stresses in concrete pavements computed by theoretical analysis*. Public Roads 7. pp: 25-35.
- Westergaard, H.M. (1926b) *Análisis of stresses in concrete pavements due to variations of temperature*. Proceedings, Highway Research Board 6. pp: 201-215.
- Yang, N.C. 1972. *Design of Functional Pavements*. New York, NY: McGraw Hill Book Company.
- Zaniewski, J.P., Butler, B.C., Cunningham, G., Elkins, G.E., Paggi, M.S. y Machemehl, R. (1982). *Vehicle Operating Costs, Fuel Consumption and Pavement type and Condition Factors*. Final Report # DOT-FH-11-9678, Federal Highway Administration, Washington, DC.

## 11.2.- DIRECCIONES DE INTERNET DE INTERES EN EL TEMA

American Concrete Pavement Association (ACPA): <http://www.acpa.org/>

American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO)  
<http://www.transportation.org/>

Empresa Alpine-FCCSA. Experiencia en este tipo de pavimentos: <http://www.alpine.at/>

